

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**AJUSTE DE MODELOS Y ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO
PARA *EUCALYPTUS DUNNII* EN LA REGIÓN SURESTE DEL
URUGUAY**

por

**Juan Agustín INDARTE MACHIAVELLO
Guillermo PEREYRA ZULUAGA FACET
Santiago SORRIBAS CAVIGLIA**

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2023**

Página de aprobación

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (MSc.) Sergio Andrés Baietto Álvarez

Codirector:

Ing. For. (MSc.) Franco Schinato

Fecha: 10 de abril de 2023

Autores:

Juan Agustín Indarte Machiavello

Guillermo Pereyra Zuluaga Facet

Santiago Sorribas Caviglia

AGRADECIMIENTOS

A nuestros tutores Ing. Agr. (MSc.) Sergio Andrés Baietto Álvarez e Ing. For. (MSc.) Franco Schinato, por guiarnos en este proceso.

A Agroempresa Forestal, por el tiempo y recursos brindados para el desarrollo de este trabajo.

A los colaboradores de la empresa, quienes nos ayudaron en las tareas prácticas de campo.

A nuestra familia y amigos, por su apoyo incondicional e incentivo a lo largo de toda la carrera.

MUCHAS GRACIAS.

TABLA DE CONTENIDO

<u>Página de aprobación</u>	<u>2</u>
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	<u>3</u>
<u>LISTA DE CUADROS Y FIGURAS</u>	<u>5</u>
<u>RESUMEN</u>	<u>7</u>
<u>ABSTRACT</u>	<u>8</u>
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>9</u>
1.1. OBJETIVOS.....	10
1.1.1. <u>Objetivo general</u>	<u>10</u>
1.1.2. <u>Objetivos específicos</u>	<u>10</u>
<u>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>11</u>
2.1. EL SECTOR FORESTAL EN URUGUAY.....	11
2.2. CARACTERÍSTICA DE <i>EUCALYPTUS DUNNII</i> MAIDEN.....	11
2.3. ZONAS DE PRODUCCIÓN FORESTAL	13
2.4. CRECIMIENTO FORESTAL.....	14
2.4.1. <u>Curvas de crecimiento</u>	<u>14</u>
2.4.2. <u>Producción de biomasa</u>	<u>15</u>
2.4.3. <u>Modelos alométricos para estimación de biomasa y carbono forestal</u>	<u>16</u>
2.5. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS.....	17
<u>3. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	<u>19</u>
3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	19
3.2. INVENTARIO FORESTAL.....	20
3.3. EVALUACIONES DESTRUCTIVAS	22
3.3.1. <u>Apeo, trozado y medición de individuos</u>	<u>23</u>
3.4. DETERMINACIÓN DE C	24
3.5. AJUSTE DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA	24
<u>4. RESULTADOS</u>	<u>26</u>
4.1. CUBICACIÓN E INVENTARIO FORESTAL	26
4.2. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA	28
4.3. ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO	31
<u>5. DISCUSIÓN</u>	<u>35</u>
<u>6. CONCLUSIONES</u>	<u>39</u>
<u>7. BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>40</u>
<u>8. ANEXO</u>	<u>45</u>

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Tabla No.	Página
Tabla No. 1 <i>Clases diamétricas y frecuencia de individuos muestreados por clase.</i>	23
Tabla No. 2 <i>Tabla de resultados de la cubicación con factor de forma promedio de cada clase, y factor de forma promedio general.</i>	26
Tabla No. 3 <i>Tabla descriptiva de las variables dasométricas del inventario forestal</i>	27
Tabla No. 4 <i>Características dendrométricas de los individuos utilizados en el muestreo destructivo.</i>	28
Tabla No. 5 <i>Características de la biomasa en las fracciones evaluadas de los individuos utilizados en el muestreo destructivo.</i>	29
Tabla No. 6 <i>Límite inferior y límite superior para cada variable.</i>	29
Tabla No. 7 <i>Tabla con los modelos ajustados.</i>	30
Tabla No. 8 <i>Estimación de biomasa a nivel de ha por parcela para las diferentes fracciones de biomasa.</i>	32
Tabla No. 9 <i>Presenta el contenido de carbono por hectárea en toneladas, que contiene cada fracción de las 10 parcelas bajo estudio.</i>	33
Tabla No. 10 <i>Porcentaje de cada fracción representada por Carbono.</i>	34
Tabla No. 11 <i>Estimación de biomasa y carbono en toneladas, contemplando toda la superficie del rodal (11,67 ha).</i>	34

<u>Figura No.</u>	<u>Página</u>
Figura No. 1 <i>Ilustración de ramas y hojas jóvenes y adultas de Eucalyptus dunnii. HA: hoja adulta. HI: hoja intermedia. Ra: rama adulta. RJ: rama juvenil.</i>	12
Figura No. 2 <i>Ilustración de yemas florales y frutos de Eucalyptus dunnii. BF: botón floral. FR: fruto.</i>	12
Figura No. 3 <i>Curva de crecimiento típica de un árbol</i>	14
Figura No. 4 <i>Relación entre el rendimiento, incremento medio anual (ima) e incremento corriente anual (i) a lo largo del ciclo del árbol.</i>	15
Figura No. 5 <i>Ejemplo de linealización utilizando un MLG con función de vínculo log.....</i>	17
Figura No. 6 <i>Mapa 2 en 1. a) La cartografía del predio; b) delimitación del rodal de estudio con las parcelas de inventario plantadas.</i>	19
Figura No. 7 <i>Primera etapa de campo. a: identificación de parcelas. b: medición de diámetro de copa mediante cinta métrica.</i>	22
Figura No. 8 <i>Segunda etapa de campo. a: identificación de individuos para trozar. b: trozado de árbol.....</i>	24
Figura No. 9 <i>Relación entre el DAP y a) biomasa en el fuste, b) biomasa en ramas finas.</i>	31
Figura No. 10 <i>Relación entre biomasa total (kg) y DAP (cm).....</i>	31

RESUMEN

El presente trabajo tuvo por objetivo estimar la biomasa aérea total y el stock de carbono (C), a través de una serie de variables dendrométricas de interés (diámetro a la altura de la base (DAB), diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro de copa (DC), altura total (HT) y comercial (HC)), en un rodal de *Eucalyptus dunnii* de 10 años de edad, sobre el grupo de suelos CONEAT 2.12. Este trabajo se llevó a cabo en un establecimiento forestal, con nombre Mi Generala, ubicado en el departamento de Florida, Uruguay (33° 47' 52 S, 55° 29' 00 O), el cual pertenece a Agroempresa Forestal S.A. Se establecieron diez parcelas que representaron el 2,57 % del área total del rodal y se realizó un inventario forestal tradicional considerando 332 árboles, distribuidos en 5 clases diamétricas. A dichos árboles se les midieron las variables DAB, DAP, DC y H. El análisis de los datos fue realizado mediante el software estadístico R, en su interfase Rstudio, a través del ajuste de modelos lineales generalizados. Se apearon y cubicaron 33 individuos de la población mediante el método de Smalian y se obtuvieron muestras de cinco fracciones (hojas, ramas finas, ramas gruesas, corteza y madera) para la determinación del contenido de humedad y C en laboratorio. La estimación de la biomasa y C secuestrado en toneladas, contemplando toda la superficie del rodal (11,67 ha), fue de 3.518,57 y 1.442,78 Mg, respectivamente. Se verificó que la mayor cantidad de biomasa y C se encuentra alojada en el fuste, luego en las ramas gruesas, hojas y por último en las ramas finas.

Palabras clave: modelos de estimación, biomasa, carbono, *Eucalyptus dunnii*

ABSTRACT

The aim of this study was to estimate the total aboveground biomass and carbon (C) stock, using a series of relevant dendrometric variables (diameter at base height (DAB), diameter at breast height (DAP), crown diameter (DC), total and commercial height (HT y HC)), for a 10-year-old stand of *Eucalyptus dunnii*, on the 2.12 CONEAT soils group. The study was conducted in a forest farm named Mi Generala, located in the department of Florida, Uruguay (33° 47' 52 S, 55° 29' 00 W), which belongs to Agroempresa Forestal S.A. Ten plots were established that represented 2.57% of the total area of the stand and a traditional forest inventory was carried out considering 332 trees, distributed in five diameter classes. The variables DAB, DAP, DC and H were measured for these trees. Data analysis was performed using the R statistical software, in its Rstudio interface, by fitting generalized linear models. 33 individuals of the population were felled and cubed using the Smalian method and samples of five biomass fractions (leaves, fine branches, thick branches, bark and wood) were obtained for the determination of the moisture content and C in the laboratory. The biomass and C estimates in tons, considering the entire area of the stand (11,67 ha), were 3,518.57 and 1,442.78 Mg, respectively. It was found that the largest amount of biomass and C is present in the stem, followed by thick branches, leaves, and finally thin branches.

Keywords: estimation models, biomass, carbon, *Eucalyptus dunnii*

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de tres décadas, el sector forestal en Uruguay se encuentra en constante crecimiento, fundamentalmente a partir de la aprobación de la segunda Ley Forestal (N° 15.939), lo que condujo a un aumento de la superficie destinada a la forestación. Una proporción relevante de dicha superficie se encuentra ocupada por plantaciones comerciales de *Eucalyptus dunnii*, especie que representa una muy buena alternativa para ser utilizada debido a su excelente combinación entre buen crecimiento, adaptabilidad y buenas propiedades papeleras (Marcó & López, 1995).

En estas plantaciones se busca maximizar el volumen maderable, lo que se asocia a una mayor producción de biomasa por unidad de superficie, conduciendo a un mayor secuestro de carbono (C), y a la mitigación del cambio climático. En este sentido, Uruguay aprobó el Acuerdo de París, a través de la ley N.º 19.439, la cual tiene por objetivo limitar el aumento de la temperatura mundial por debajo de los 2 °C, a través de la regulación de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En este contexto, el país ha establecido el objetivo de mantener el stock de C existente tanto en bosques nativos como en plantaciones forestales. Para esto, se estableció un área mínima forestal efectiva a mantener más allá de las fluctuaciones del ciclo forestal (Ministerio de Ambiente [MA], 2020).

En la actualidad, entre las áreas prioritarias para la producción forestal en Uruguay, la de los grupos de suelos CONEAT 2 es una de las que presenta mayor disponibilidad de superficie de prioridad para forestar. Teniendo esto en cuenta, el ajuste de modelos de estimación de biomasa en esta región tiene un gran potencial para permitir la cuantificación de la biomasa aérea y stocks de C en plantaciones forestales (Montero & Montagnini, 2005). En este contexto, el presente trabajo constituye una aproximación a la modelación de la biomasa forestal y a la cuantificación del stock de C en plantaciones de *E. dunnii* de 10 años de edad, sobre el grupo de suelos 2.12 de la región sureste del Uruguay.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general de este estudio fue estimar y predecir la biomasa en plantaciones de *Eucalyptus dunnii* de 10 años sobre suelos del grupo CONEAT 2.

1.1.2. Objetivos específicos

Para esto se consideraron los siguientes objetivos específicos:

- Ajustar modelos directos para la estimación de biomasa;
- Estimar el volumen y la biomasa en las fracciones fuste, ramas, hojas, corteza y total de la población de estudio;
- Estimar el stock de carbono en la biomasa aérea y sus fracciones.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. EL SECTOR FORESTAL EN URUGUAY

El crecimiento del rubro forestal en Uruguay se ha reflejado en el gran protagonismo que el mismo tiene dentro de la producción agropecuaria, con plantaciones forestales ocupando una superficie total de 1,15 millones de ha afectadas (Sociedad de Productores Forestales [SPF], 2022b). A su vez, la Dirección General Forestal (DGF, 2021) cuantificó una superficie forestada de 1.048.228 ha efectivas y 38.881 ha cosechadas, lo que totaliza 1.087.109 ha efectivas. Dicho crecimiento se ha basado en el establecimiento de plantaciones comerciales de distintas especies de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*, las cuales alcanzaron 795.703 y 152.939 ha efectivas, respectivamente. Las especies que ocupan mayor superficie efectiva respecto al total forestado son *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*. Dentro de las especies de coníferas, *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* son las más representativas en términos de superficie.

En lo que respecta a *E. dunnii*, especie de interés de este trabajo, ocupa una superficie total de 216.581 ha, lo cual es equivalente al 19,9% de la superficie efectiva destinada a la forestación. Con respecto a las plantaciones menores a 3 años, se cuantificó para el periodo 2018-2021 un total de 242.079 ha efectivas, dividiéndose la superficie según las encuestas de vivero de la siguiente manera: 49% *E. dunnii*, 36% *E. grandis*, 11% de otros *Eucalyptus* y 4% de *Pinus*; por lo tanto, se proyecta que la superficie destinada a *E. dunnii* siga en aumento (DGF, 2021).

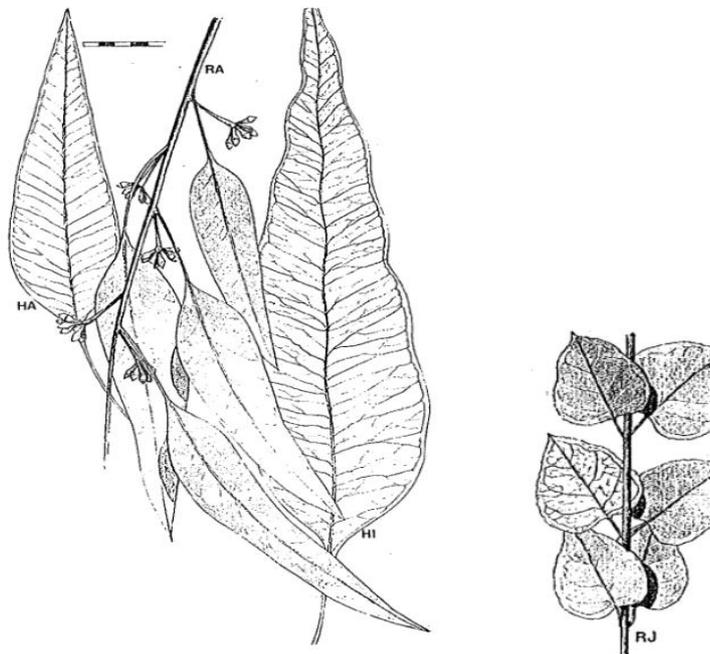
2.2. CARACTERÍSTICA DE *EUCALYPTUS DUNNII* MAIDEN

E. dunnii se caracteriza por ser un árbol de fuste recto, de follaje péndulo y corteza caduca en fajas largas, pero persistente en la base del tronco. Por un lado, sus hojas juveniles pueden ser opuestas o subopuestas y pecioladas, presentando una forma que puede ir desde oval hasta elíptica y de coloración verde. Por otra parte, las hojas adultas también son pecioladas, pero su filotaxia es alterna y su forma lanceolada (Figura No. 1). Esta especie presenta inflorescencias de tipo simple y axilares, que están conformadas por 7 flores cuyos botones florales son de forma ovoide (Figura No. 2) (Brussa, 1994).

El momento de la floración se produce desde finales de la primavera y durante el verano. En lo que respecta a las principales características de su madera, esta presenta un duramen de coloración amarillenta cuya durabilidad es baja y su densidad es de 800 kg m^{-3} , lo que deriva en que sea principalmente utilizada en construcciones livianas y producción de pasta de celulosa (Boland et al., 1987, como se cita en Brussa, 1994). La madera de esta especie se asemeja a la madera de *Eucalyptus globulus* (Boland et al., 2006).

Figura No. 1

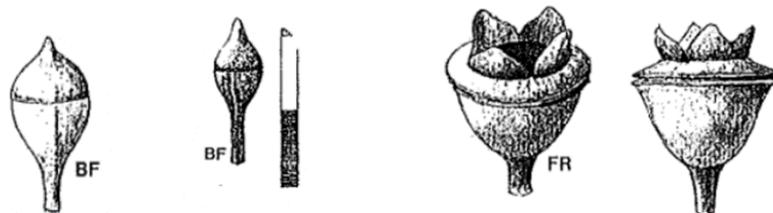
Ilustración de ramas y hojas jóvenes y adultas de *Eucalyptus dunnii*. HA: hoja adulta. HI: hoja intermedia. Ra: rama adulta. RJ: rama juvenil.



Nota. Adaptado de Brussa (1994).

Figura No. 2

Ilustración de yemas florales y frutos de *Eucalyptus dunnii*. BF: botón floral. FR: fruto.



Nota. Adaptado de Brussa (1994).

En cuanto a su distribución natural, *E. dunnii* ocurre en un área restringida, en el noreste de Nueva Gales del Sur y al sureste de Queensland, en un rango de altitud de entre 220 y 860 m sobre el nivel del mar (Brussa, 1994). Las precipitaciones anuales promedio se encuentran entre 1.000 y 1.600 mm, con un período seco de 3 meses en la estación más fría del año. En cuanto a las temperaturas, la máxima del mes más cálida alcanza entre 24 y 29 °C y la mínima del mes frío entre 2 y 5 °C. La incidencia de heladas oscila entre 20 y 60 eventos por año durante el invierno. Esta especie se distribuye fundamentalmente en suelos húmedos, altamente fértiles, particularmente de origen basáltico, pero también en aquellos derivados de rocas sedimentarias (Boland et al., 2006). En Uruguay esta especie ha sido ampliamente utilizada dada su alta productividad y capacidad para tolerar bajas temperaturas, características que la hacen muy útil para posiciones topográficas bajas (Balmelli & Resquin, 2006).

2.3. ZONAS DE PRODUCCIÓN FORESTAL

Uruguay se encuentra ubicado en la región templada de América del Sur, en la misma latitud y región climática de países como Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Chile, algunos de los principales productores forestales en el mundo. Los Departamentos en donde se concentran mayormente las plantaciones forestales en Uruguay son Rivera, Tacuarembó, Paysandú, Río Negro y Lavalleja, dado que estos cuentan con suelos que poseen características que los hacen aptos para la forestación y de baja productividad agrícola-ganadera (SPF, 2022a).

Los suelos destinados a la producción forestal están categorizados bajo dos conceptos: la aptitud y la prioridad forestal. La aptitud forestal supone una definición técnica, mientras que la prioridad supone una definición jurídica. La segunda, con base en la primera definición, tiene como objetivo el ordenamiento de las plantaciones forestales promovidas por la ley N° 15.939 en función de la aptitud de suelo y la reducción de la competencia con otros tipos de producción (Durán & García, 2007).

En este contexto la producción forestal se desarrolla en tres regiones: Norte (Rivera y Tacuarembó); Noreste y Sureste (Cerro Largo, Treinta y Tres, Rocha, Lavalleja y Maldonado); y Litoral Oeste y Centro (Durazo, Paysandú, Río Negro, Soriano). La primera representa el 36% del total nacional que está forestado y aproximadamente posee el 30% suelos de prioridad efectivamente plantados, cuyo destino principal es la madera sólida (aserrado-debobinado), siendo *Pinus taeda* la especie principal (cuya área se ha visto reducida durante los últimos años), y con importante presencia de *Eucalyptus grandis* (SPF, 2022a).

La segunda, ocupa el 34% del total nacional forestado, con 17% de suelos de prioridad efectivamente plantados, siendo el principal destino la madera sólida y la producción de celulosa (doble propósito), con predominancia de *E. grandis* en el norte y de *Eucalyptus globulus* en el sur (actualmente disminuyendo y siendo sustituida por *E. dunnii*). Finalmente, la zona del Litoral Oeste y Centro concentra el 30% del total nacional forestado y aproximadamente el 23% de suelos de prioridad efectivamente plantados, donde el destino principal es la producción de celulosa y producción de aserrío, siendo las especies predominantes *E. dunnii* y *E. grandis* (SPF, 2022a).

Particularmente, en la región sureste del país se concentran los suelos de prioridad forestal de los grupos CONEAT 2. Estos grupos se extienden en una franja irregular con dirección SW-NE desde el sur del Departamento de Maldonado hacia el Departamento de Cerro Largo. Se incluye también en esta zona la isla cristalina del Departamento de Rivera y las Sierras de Aceguá y Mal Abrigo. El paisaje predominante es de sierras, con afloramientos rocosos de densidad inestable y colinas. En cuanto al relieve, este es quebrado presentando ondulaciones fuertes. Presenta rocas ígneas, metamórficas y algunas rocas efusivas ácidas como material geológico principal. Los suelos son tanto superficiales como moderadamente profundos de fertilidad media en las áreas de sierras, y moderadamente profundos a profundos con fertilidad media en la región de colinas (Petraglia & Dell'Acqua, 2010).

2.4. CRECIMIENTO FORESTAL

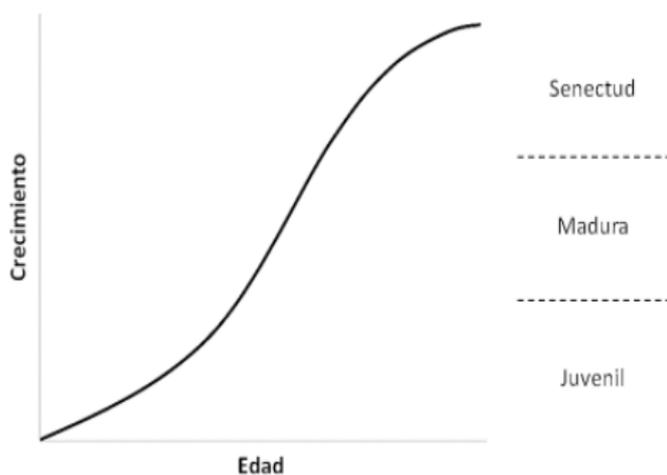
El crecimiento de los árboles puede ser determinado mediante el aumento de cualquier característica medible, como el diámetro, altura, volumen y biomasa (Juárez, 2014). El crecimiento de los árboles es un fenómeno biológico complejo (Pretzsch, 2009), resultante de la actividad de las yemas (crecimiento primario) y del cambium (crecimiento secundario), el cual está fuertemente influenciado por las características genéticas del árbol y su interacción con el sitio (Picard et al., 2012). En forestación, el uso del término sitio hace referencia al área donde la combinación de suelo y clima son homogéneos para el crecimiento y desarrollo del componente vegetal (Schlatter & Gerding, 2014). Además de los factores genéticos y ambientales, el manejo silvicultural influye directamente en el crecimiento y la producción de biomasa (Prodan et al., 1997).

2.4.1. Curvas de crecimiento

El comportamiento del crecimiento forestal puede ser representado mediante una curva de crecimiento de tipo sigmoideal. Esta curva tiene tres fases, la primera corresponde a la edad juvenil, la segunda a la edad madura y la última a la edad de senectud. La edad juvenil se caracteriza por un crecimiento rápido del tipo exponencial, por su parte la edad madura, muestra un crecimiento lineal debido a que presenta períodos iguales con crecimiento semejantes. Mientras tanto, la edad de senectud se caracteriza por un crecimiento decreciente por lo que gráficamente se observa una asíntota (Juárez, 2014) (Figura No 3).

Figura No. 3

Curva de crecimiento típica de un árbol



Nota. Tomado de Juárez (2014).

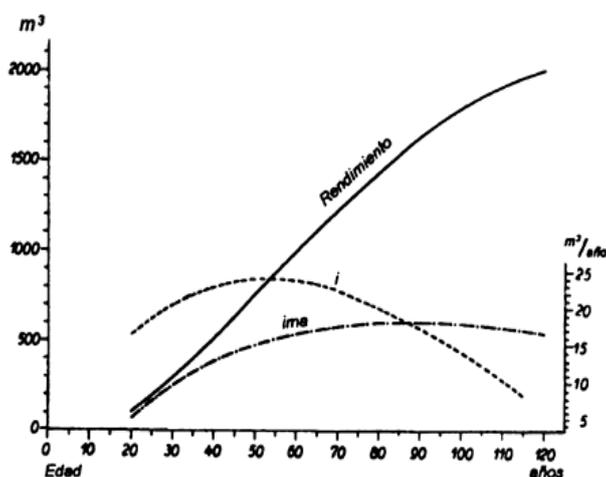
Considerando el crecimiento en función del tiempo, se pueden distinguir tres indicadores: incremento periódico ($IP \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), incremento corriente anual ($ICA \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) e incremento medio anual ($IMA \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). El IP corresponde al incremento acumulado durante un período de varios años (Prodan et al., 1997). El ICA expresa el incremento entre el inicio y el final de un período de 12 meses. Finalmente, el IMA refleja el crecimiento total a una cierta edad (Dávila

Lara, 2015). A lo largo del ciclo de vida de una especie forestal, las curvas que presentan los indicadores anteriormente mencionados varían en función de la edad.

El ICA muestra una curva que aumenta rápidamente, sobre todo en los primeros años, llegando a su máximo generalmente antes de la mitad de la rotación productiva, punto a partir del cual decrece. Por otra parte, el comportamiento que presenta la curva del IMA difiere respecto a la del ICA, debido a que se alcanza de forma más tardía en el ciclo, un descenso en la tasa de crecimiento. Dicho descenso se da a partir de la intersección con la curva del ICA, punto desde el cual, la curva del IMA disminuye en forma más gradual que la de incremento corriente anual (Prodan et al., 1997) (Figura No. 4).

Figura No. 4

Relación entre el rendimiento, incremento medio anual (ima) e incremento corriente anual (i) a lo largo del ciclo del árbol.



Nota. Tomado de Prodan et al. (1997).

2.4.2. Producción de biomasa

La evaluación de la biomasa forestal es de gran importancia para diferentes propósitos (Parresol, 1999), destacando dos objetivos principales como lo son: el uso de recursos y la gestión ambiental de los bosques. La cuantificación de la biomasa es fundamental para evaluar tanto la productividad, así como también la sostenibilidad del bosque. Además, es un indicador de referencia del secuestro de C, ya que la cantidad de C secuestrado se puede inferir del cambio de biomasa debido a que aproximadamente el 50% de la biomasa seca del bosque es C (Losi et al., 2003).

La tasa de acumulación de biomasa vegetal resulta de la diferencia entre la asimilación bruta de C (productividad primaria bruta, PPB) y las pérdidas dadas por respiración por unidad de tiempo y superficie, siendo equivalente a la productividad primaria neta (PPN) (Origgi, 1993). Es predecible la forma en que varía la PPN forestal con la edad de los árboles; esto hace que la información desde el punto de vista cuantitativo sobre la relación existente entre la PPN y la edad para distintas regiones y tipos de bosques adquiera gran importancia a la hora de realizar la modelización del ciclo del C forestal (He et al., 2012).

Frecuentemente, en evaluaciones de biomasa, la misma es separada en un componente aéreo y otro subterráneo (Salas & Infante, 2006). La biomasa presente en pie puede ser utilizada como un indicador de productividad y de la capacidad de capturar C que tiene una plantación forestal. A través de dicho indicador es posible conocer el potencial de rendimiento que presenta una determinada combinación de especie, sitio, edad y manejo (Castañeda-Mendoza et al., 2012).

2.4.3. Modelos alométricos para estimación de biomasa y carbono forestal

Los modelos de predicción de biomasa forestal pueden ser desarrollados mediante métodos directos e indirectos. El método directo se caracteriza por ser destructivo, en él se obtienen muestras de individuos de una población para la determinación de la biomasa disponible en las diferentes fracciones, como hojas, ramas, fuste y raíces (Simangunsong et al., 2017). Este tipo de medición permite realizar estimaciones de biomasa con alta precisión, aunque requieran de elevada cantidad de tiempo y recursos, especialmente a la hora de considerar diferentes compartimentos como ramas u hojas (Antepara-Basurto, 2019). Por su parte, el método indirecto se basa en la medición de variables de fácil medición para luego generar modelos de estimación a partir de variables dendrométricas, tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (HT), altura comercial (HC), etc. (Fonseca, 2017).

La alometría se encuentra basada en la hipótesis de la proporcionalidad existente entre las tasas relativas de crecimiento que hay entre dos variables de tamaño, como lo pueden ser el peso de diferentes secciones o el de parte de un organismo o una de sus dimensiones (Broad, 1998). En base a estas relaciones es posible ajustar modelos para estimar biomasa (modelos alométricos), útiles para diversos propósitos, fundamentalmente para cuantificar las reservas de C y la dinámica en los bosques. Para llevar a cabo dichas estimaciones en los bosques, existen diferentes métodos, los cuales, generalmente reúnen datos provenientes de inventarios forestales y factores de expansión o el ajuste de modelos de regresión lineal, no lineal o modelos lineales generalizados (MLG) (Sanquetta et al., 2011; Chabi et al., 2016). A partir de un modelo ajustado se pueden estimar biomasa y C en plantaciones forestales mediante inventarios forestales.

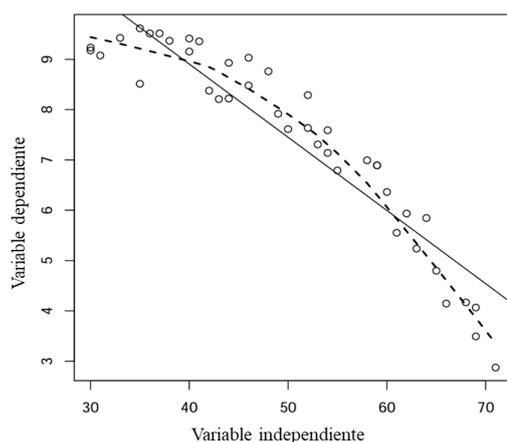
Para lograr la mejor estimación posible de la biomasa bajo estudio, es esencial conocer las fuentes de error que pueden llegar a afectar dicha estimación. Una de las etapas en la cual se pueden cometer errores, es al momento del muestreo, tanto en primera como en segunda fase. En primera fase, cuando se realiza la selección de parcelas que constituyen la muestra (como, por ejemplo, mediante una baja intensidad de muestreo) basándose tanto en fotografías aéreas como en imágenes satelitales; en segunda fase al momento de seleccionar los árboles que posteriormente se van a medir para desarrollar la ecuación de biomasa (Cunia, 1986a, 1986b). Otra de las posibles fuentes de error tiene que ver con la medición de las distintas variables del árbol (DAP, DAB, HT, etc.) y puede ocurrir en el uso del instrumento, de registro y de características del objeto medido (Juárez, 2014). La elección del modelo utilizado para describir la relación existente entre la biomasa forestal y las distintas variables dendrométricas también es considerada una posible fuente de error, lo que destaca su importancia para la precisión de las estimaciones (Jenkins et al., 2003).

2.5. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS

Los abordajes clásicos para establecer modelos de predicción de biomasa forestal utilizan regresiones lineales entre la variable dependiente y el predictor lineal, el cual puede estar formado por diferentes variables independientes. Esta categoría de modelos estadísticos asume normalidad en la distribución de sus residuos y homogeneidad de varianza, además de la existencia de independencia entre las observaciones y errores del modelo. Sin embargo, a veces estos supuestos no se cumplen al ajustar estos modelos predictivos (Cayuela, 2009, Picard et al., 2012). En estos casos, surge como alternativa el uso de MLG, los cuales flexibilizan las asunciones del modelo lineal. Los MLG poseen dos propiedades fundamentales en las que se puede especificar una familia de distribución para los errores y una función de vínculo entre la variable dependiente y el predictor lineal (Cayuela, 2009, Di Rienzo et al., 2012). En el caso de la modelación de variables continuas, la distribución Gamma es una de las más utilizadas para el desarrollo de modelos de estimación de biomasa forestal (Chabi et al., 2016). Esta distribución es utilizada cuando la varianza de la variable independiente aumenta de forma conjunta con un aumento constante de la media de la muestra (Cayuela, 2009). En cuanto a la función de vínculo, para esta familia de distribución, una de las más comúnmente utilizadas es la logarítmica (Kuyah et al., 2012, Beets et al., 2012). Esta función de vínculo permite linealizar la relación entre la variable dependiente y las variables independientes (Figura No. 5).

Figura No. 5

Ejemplo de linealización utilizando un MLG con función de vínculo log.



Nota. Línea punteada indica la relación original entre las variables y línea continua indica la linealización realizada en un MLG, con función de vínculo log. Adaptado de Cayuela (2009).

En la evaluación de la calidad del ajuste de un MLG, generalmente se emplean los criterios de menor valor del Criterio de Información de Aikaike (AIC), pseudo-coeficiente de determinación (pseudo- R^2), significancia de los parámetros

empleados en el modelo, interpretación del gráfico de dispersión de los residuos estandarizados vs los valores predichos y gráficos de dispersión entre los valores predichos y observados (Cayuela, 2009, Zuur et al., 2009).

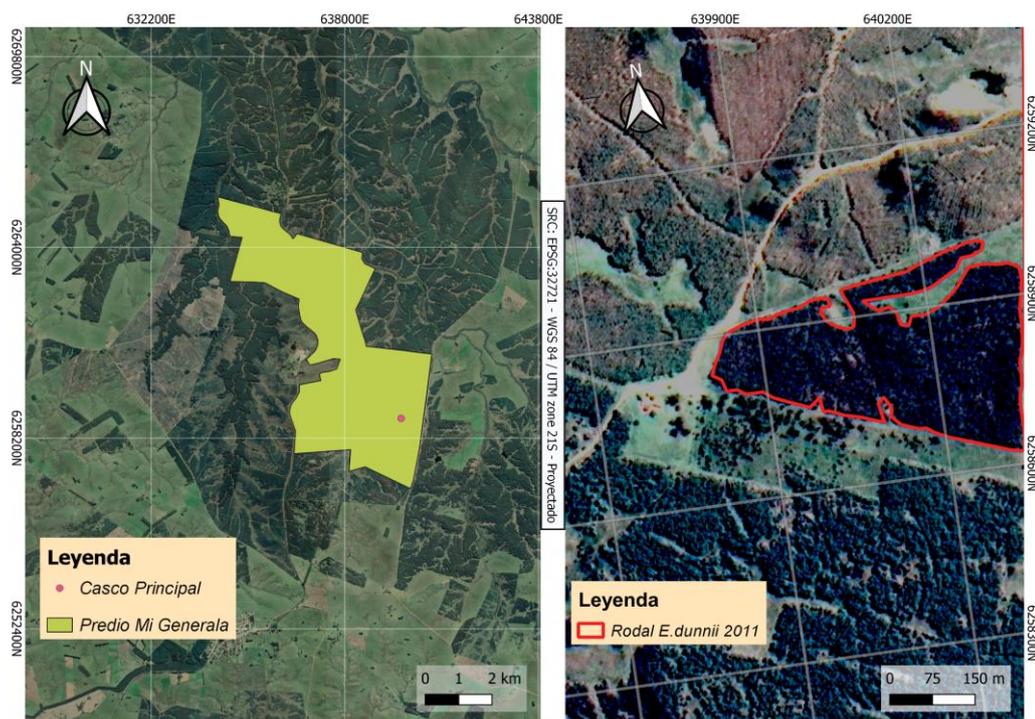
3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio fue realizado en el establecimiento forestal “Mi Generala”, ubicado en el departamento de Florida (33°47′52 S, 55°29′00 O), el cual pertenece a Agroempresa Forestal S.A. El predio ocupa un total de 2319,8 ha, de las cuales 1225,1 ha (52,8%) representan la superficie efectivamente forestada (Figura No. 6). Entre estas ocurre un predominio en el uso de las especies *E. grandis* y *E. dunnii*, las cuales ocupan 337 ha (27,5%) y 578,2 (47,2%) ha efectivas, respectivamente. Las demás especies del género *Eucalyptus*, así como híbridos de este género, comprenden una superficie de 309,9 ha (25,3%). Este estudio fue desarrollado sobre un rodal de 11,67 ha establecido en 2011 con *E. dunnii* de origen seminal. Las evaluaciones fueron realizadas en una plantación con 10 años de edad, período de rotación a turno final comúnmente utilizado en la zona para la obtención de madera con fines celulósicos.

Figura No. 6

Mapa 2 en 1. a) La cartografía del predio; b) delimitación del rodal de estudio con las parcelas de inventario plantadas.



Nota. Adaptado de Google Earth (2022).

Los suelos pertenecientes al rodal de estudio se encuentran dentro del grupo CONEAT 2.12. Este presenta sierras no rocosas con un relieve que va de ondulado a ondulado fuerte, teniendo en términos generales afloramientos rocosos por debajo de 5% y una variabilidad en pendientes entre 5 y 15%. Los suelos del grupo son Brunosoles Subéutricos Háplicos y Típicos, arenoso francos y francos, a

veces arenosos a franco gravillosos, superficiales y moderadamente profundos (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca [MGAP], 2020).

Según la clasificación de Köppen (1936), Uruguay se encuentra dentro del grupo C, perteneciendo a un clima de latitudes medias que se caracterizan por ser húmedos con una temperatura media del mes más frío que oscila entre -3°C y 18°C y temperaturas del mes más cálido superiores a 10°C . A su vez dentro del grupo C, existen diferentes tipos de clima correspondiéndole a Uruguay la clasificación Cfa de subtropical húmedo. Este clima presenta inviernos fríos o templados y veranos húmedos y cálidos, con precipitaciones bien distribuidas a lo largo del año.

A continuación, se presenta una caracterización de las variables climáticas más importantes, para el departamento de Florida. Los datos fueron obtenidos a través de la caracterización agroclimática del Uruguay (Castaño et al., 2011), el cual presenta las estadísticas climáticas del período 1980-2009. La temperatura media anual para la región central es de $17,7^{\circ}\text{C}$, la temperatura máxima media es de $23,2^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura mínima media es de $12,6^{\circ}\text{C}$. Por otra parte, el clima corresponde a templado y semihúmedo, con un régimen de precipitaciones isohigro, cuyo volumen promedio anual alcanza los 1.014,4 mm. El período de ocurrencia de heladas se da entre mayo y octubre, acumulándose anualmente más de 35 días con heladas, siendo algunas de estas catalogadas como severas.

3.2. INVENTARIO FORESTAL

Considerando la superficie de 11,67 ha del rodal considerado en el estudio, fueron realizadas 10 parcelas de inventario forestal de 300 m^2 ($20 \times 15\text{ m}$), ubicadas de forma aleatoria. Se asumió una intensidad de muestreo equivalente a 2,57% del área total (Figura No. 7). En cada parcela de inventario, inicialmente se procedió con la descripción del perfil del suelo con el objetivo de obtener las características generales del mismo.

En las parcelas de inventario fueron medidas las siguientes variables de todos los individuos ($N = 332$): circunferencia a la altura del pecho (CAP), circunferencia a la altura de la base (CAB), altura total (HT), altura de copa (Hc) y diámetro de copa (DC). Los diámetros fueron medidos con cinta métrica, y las alturas utilizando un clinómetro digital Haglöf EC II D-R (Haglöf, Långsele, Sweden). A partir de los datos recolectados y ecuaciones (Ec.) listadas en este documento, fueron calculados las siguientes variables e indicadores: tamaño mínimo de muestra (Ec. 1), área basal individual (Ec. 2), factor de expansión (Ec. 3), área basal por hectárea (Ec. 4), volumen individual (Ec. 5), y volumen por hectárea (Ec. 6). Para poder llevar a cabo el cálculo del volumen individual, previamente se utilizó el método de Smalian (Ec. 7) que permite calcular el volumen de madera que contiene una troza. A partir de la obtención del volumen real y del volumen de un cilindro se puede obtener el factor de forma (Ec. 8) de los individuos. El método de Smalian se aplicó midiendo el diámetro cada 25 cm desde la sección de corte hasta el primer metro, y posteriormente cada un metro hasta la punta fina (5 cm). La herramienta utilizada para llevar a cabo estas mediciones fue la forcípula con la cual se tomaron dos medidas perpendiculares para posteriormente realizar un promedio de estas y que el dato sea más preciso (Ordoñez et al., 2012).

$$N_{\min.} = \frac{(z_{(N-1)}^2 \times S_y^2 N)}{z_{(N-1)}^2 \times S_y^2 + e^2(N-1)} \quad \text{Ec. 1}$$

$$g_i = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad \text{Ec. 2}$$

$$fe = \frac{10.000}{a} \quad \text{Ec. 3}$$

$$G = \sum g_i \times fe \quad \text{Ec. 4}$$

$$v_i = g_i \times h_i \times f_{cd} \quad \text{Ec. 5}$$

$$V = \sum v_i \times fe \quad \text{Ec. 6}$$

$$V_{Smalian} = \frac{(S_1 + S_2)}{2} L \quad \text{Ec. 7}$$

$$FF = \frac{V_{real}}{V_{cilindro}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$N_{\min.}$ = es el tamaño mínimo de muestra, z es el valor de la distribución z , N = el número de parcelas realizadas, S_y = el desvío estándar de la muestra (N), e = el número de Euler, g_i = el área basal individual ($m^2 \text{ árbol}^{-1}$), D = el diámetro a la altura del pecho (m), fe = el factor de expansión, a = el área de la parcela (m^2), G = el área basal por hectárea ($m^2 \text{ ha}^{-1}$), v_i = el volumen individual ($m^3 \text{ árbol}^{-1}$), h_i = la altura individual (m), f_{cd} = el factor de forma de la especie para la clase de diámetro (cd) del árbol (i), V = el volumen por hectárea ($m^3 \text{ ha}^{-1}$), $V_{Smalian}$ = el volumen de la troza utilizando el método de Smalian (m^3), L = la longitud de la troza (m), S_1 = el área basal mayor de cada troza (m^2), S_2 = el área basal menor de cada troza (m^2), FF = el factor de forma obtenido, V_{real} = el volumen real obtenido por el método de Smalian (m^3) y $V_{cilindro}$ = el volumen del cilindro obtenido por multiplicación del área basal y la altura total del individuo (m^3).

Figura No. 7

Primera etapa de campo. a: identificación de parcelas. b: medición de diámetro de copa mediante cinta métrica.

**3.3. EVALUACIONES DESTRUCTIVAS**

Las evaluaciones destructivas tienen el objetivo de determinar el factor de forma y obtener la biomasa (kg) de los diferentes compartimentos. A partir de los resultados obtenidos en la etapa de inventario forestal, fue realizada la separación de los individuos medidos en clases de circunferencia a la altura del pecho para posteriormente llevar a cabo la selección de los árboles en los cuales se realizaron las evaluaciones destructivas. La selección de individuos se realizó considerando aquellos con competencia equilibrada, sin deformaciones ni bifurcaciones, de buen estado sanitario, sin torsiones y de copa balanceada. En total, fueron evaluados 33 árboles, distribuidos proporcionalmente en función de la frecuencia de las clases de circunferencia de la población (Tabla No. 1).

Tabla No. 1*Clases diamétricas y frecuencia de individuos muestreados por clase.*

Clases de CAP	Rango de clases	Frecuencia	N
Clase 1	CAP \geq 83	9,09%	3
Clase 2	67 \leq CAP \leq 82,9	15,15%	5
Clase 3	51 \leq CAP \leq 66,9	39,39%	13
Clase 4	35 \leq CAP \leq 50,9	24,24%	8
Clase 5	CAP \leq 34,9	12,12%	4

3.3.1. Apeo, trozado y medición de individuos

Luego de la determinación de las frecuencias de clase, a cada uno de los 33 árboles seleccionados se les realizó el mismo procedimiento. Se comenzó con las mediciones de CAB, CAP y DC mediante la utilización de una cinta métrica, transformando luego los datos de circunferencia obtenidos en diámetros (DAB y DAP). Posteriormente se realizó el apeo de los individuos, para luego determinar la altura de primera rama viva, altura comercial (a 5,0 cm de diámetro), altura total y volumen real mediante el método de Smalian (Ec. 7) (Figura No. 8).

Posteriormente se realizó la separación de las fracciones en ramas finas (menor a 2 cm de diámetro), ramas gruesas (mayor a 2 cm de diámetro), hojas y fuste. Luego se realizó el trozado del fuste con motosierra, determinando largos de trozas que permitiera su fácil manipulación para su posterior pesado en balanza. Se tomó un disco al DAP como muestra del fuste de cada uno de los árboles apeados para luego ser analizado en laboratorio. Las demás fracciones fueron depositadas dentro de bolsas para luego ser pesadas mediante una balanza. De cada fracción y árbol considerado, se tomaron muestras utilizadas para los análisis de laboratorio, siendo pesadas en una balanza inmediatamente al corte con el objetivo de registrar el peso húmedo.

Las muestras extraídas de cada fracción fueron posteriormente secadas en estufa de circulación forzada a 60°C hasta peso constante. Con esta información fue posible calcular el peso seco de cada fracción. Una vez obtenida la biomasa de las diferentes fracciones, se determinó la biomasa total individual correspondiente a los 33 árboles que formaron parte del muestreo destructivo, mediante la sumatoria de sus fracciones (Ec. 9).

$$B_T = B_F + B_H + B_{Rg} + B_{Rf} + B_C + B_M \quad \text{Ec. 9}$$

Donde B_T es la biomasa total individual (kg árbol^{-1}), B_F es la biomasa en hojas (kg árbol^{-1}), B_{Rg} es la biomasa en ramas gruesas (kg árbol^{-1}), B_{Rf} es la biomasa en ramas finas (kg árbol^{-1}), B_C es la biomasa en corteza (kg árbol^{-1}), B_M es la biomasa en mantillo (kg árbol^{-1}).

Figura No. 8

Segunda etapa de campo. a: identificación de individuos para trozar. b: trozado de árbol.

**3.4. DETERMINACIÓN DE C**

Para llevar a cabo la determinación de carbono en laboratorio, las muestras de las 5 fracciones de biomasa (hojas, ramas finas, ramas gruesas, corteza y madera) se secaron en estufa de ventilación forzada (60 °C) y posteriormente se molieron hasta un tamaño de partícula < 0,5 mm. El material molido fue mezclado y luego se realizó la toma de 5 muestras compuestas por cada fracción. El contenido de C total se determinó por vía húmeda y posterior colorimetría considerando cada una de las muestras compuestas (Nelson & Sommers, 1996).

3.5. AJUSTE DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA

Los modelos de estimación de biomasa (Ec. 10) fueron realizados mediante el ajuste de MLG, utilizando la distribución de probabilidad Gamma y función de vínculo del tipo log (Chabi et al., 2016). El uso de estos modelos se debió a la flexibilización de los supuestos de los modelos lineales generales en cuanto a la normalidad y homogeneidad de la varianza de los residuos (Zuur et al., 2009; Di Rienzo et al., 2012). La elección de la familia de distribución y función de vínculo fue realizada con base en los histogramas de las variables dependientes, que presentaron ser predominantemente Gamma, siendo una de las más comúnmente utilizadas en la modelación de variables continuas en MLG. En el ajuste de los modelos las siguientes variables fueron consideradas como explicativas: DB, DAP,

HT, Dc y Hc. Para cada fracción de la biomasa se evaluó la mejor combinación de las mismas, siendo mantenidas en los modelos de regresión únicamente aquellas significativas y que resultaron en el mejor ajuste. Además, para las fracciones del fuste, ramas finas y para la biomasa total fueron ajustados modelos conteniendo solamente el DAP como variable explicativa. La misma es fácilmente obtenida y evaluada en los inventarios forestales.

$$Y_f = e^V \quad \text{Ec. 10}$$

Donde Y es la variable de respuesta, asumida como la biomasa presente en la fracción (f), e es el número de Euler, representando la función de enlace, V es el predictor lineal resultante del ajuste del modelo para cada fracción con las variables explicativas seleccionadas y el error.

La selección de la mejor combinación de variables en la construcción de los modelos de regresión fue realizada mediante la función *dredge* de Selección Automatizada de Modelos (SAM). Para el modelo con mejor ajuste indicado por esta función, se comprobaron las siguientes condiciones para la verificación de la calidad del ajuste: gráfico de dispersión de los residuos estandarizados vs los valores predichos (función *resid_panel*); colinealidad entre las variables presentes en el predictor lineal (función *vif*), asumiendo un valor máximo de VIF igual a 5; identificación y eliminación de *outliers* (método de la Distancia de Cook); gráfico de dispersión de los valores observados y los predichos (función *plot*); valor del Pseudo R² (McFadden). El Pseudo R² de McFadden fue calculado en base a la relación entre la devianza obtenida para el modelo ajustado y la devianza obtenida para un modelo nulo, conteniendo únicamente el intercepto (Ec. 11, Nakagawa et al., 2017). Los procedimientos descritos fueron realizados en el software R versión 4.2.0.

$$Pseudo R^2 = \left(1 - \left(\frac{devianza\ del\ modelo\ ajustado}{devianza\ del\ modelo\ nulo} \right) \right) \quad \text{Ec.11}$$

4. RESULTADOS

Los resultados generados en este estudio se presentan agrupados en: (4.1) cubicación e inventario forestal, (4.2) modelos de estimación de biomasa y (4.3) estimación de biomasa y carbono forestal.

4.1. CUBICACIÓN E INVENTARIO FORESTAL

A continuación, se presentan los factores de forma obtenidos para cada clase diamétrica. Los resultados de la cubicación son para los 33 árboles que fueron sometidos a evaluaciones destructivas.

Tabla No. 2

Tabla de resultados de la cubicación con factor de forma promedio de cada clase, y factor de forma promedio general

Clases de diámetro	FF promedio
1	0,3630
2	0,3934
3	0,3560
4	0,3760
5	0,3635
Promedio	0,3703
D. E.	0,0147
C. V.	3,97%

Nota. FF = Factor de forma

En la Tabla No. 2 se puede observar que el valor más bajo de factor de forma se verificó para la clase de diámetro 3, que va de $51 \leq \text{CAP} \leq 66,9$ cm, y el factor de forma más alto fue para la clase de diámetro 2 (FF= 0,3934), que va de $67 \leq \text{CAP} \leq 82,9$ cm. El promedio asumió un valor de 0,3703 con un D. E. de 0,0147 y un C. V. de 3,97%.

En la Tabla No. 3 se presentan los valores promedio obtenidos por parcela correspondientes a las variables dasométricas estimadas para los 332 árboles que formaron parte del inventario forestal.

Tabla No. 3*Tabla descriptiva de las variables dasométricas del inventario forestal*

Parcela	N árboles/ parcela	N árboles/ ha	Promedio de DAP (cm)	Promedio de DC (m)	Promedio de H (m)	Promedio de gi (m ² árbol ⁻¹)	Promedio de G (m ² ha ⁻¹)	Promedio de VTi (m ³ árbol ⁻¹)	Promedio de V (m ³ ha ⁻¹)
1	47	1175	18,37	4,43	19,11	0,0286	33,61	0,2155	253,16
2	32	1067	18,55	3,70	18,35	0,0295	31,45	0,2143	228,61
3	31	1033	17,19	3,88	16,77	0,0243	31,36	0,1507	155,76
4	37	1233	19,35	3,91	19,33	0,0310	38,23	0,2326	286,90
5	34	1133	18,48	4,33	17,90	0,0296	33,61	0,2126	244,88
6	29	967	20,49	4,32	19,23	0,0352	33,77	0,2575	248,88
7	28	933	17,93	4,27	16,76	0,0276	25,82	0,1863	173,86
8	31	1033	21,18	4,23	18,52	0,0380	38,95	0,2661	274,96
9	30	1000	19,20	4,22	17,45	0,0311	31,14	0,2122	212,24
10	33	1100	18,02	4,14	18,62	0,0276	30,431	0,2034	223,71
Media	33,2	1068	18,88	4,14	18,16	0,0302	32,24	0,2155	230,30
D. E.	5,49	93,99	1,21	0,23	1,00	0,0039	3,50	0,03	41,36
C. V.	16,5%	8,8%	6,43%	5,67%	5,51%	12,97%	10,9%	15,33%	18,0%

Nota. D. E. = desvío estándar, C. V. = coeficiente de variación, DAP = diámetro a la altura del pecho, DC = diámetro de copa, H = altura, gi = área basal individual, G = área basal, VTi = volumen total individual y V = volumen.

El promedio de DAP más alto verificado fue de 21,18 cm, mientras que el DAP promedio más bajo fue de 17,19 cm. El promedio general de todos los árboles evaluados fue de 18,88 cm, con un D. E. de 1,21 y un C. V. de 6,43%. En cuanto al DC, el promedio general fue de 4,14 m, con un D. E. de 0,23 y un C. V. de 5,67%, siendo la parcela 2 la que presentó el registro más bajo (3,70 m) y la parcela 1 el más alto (4,43 m).

La H promedio verificada para los árboles evaluados fue de 18,16 m, con un D. E. 1,0 y un C. V. de 5,51%. En la parcela 4 se obtuvieron los árboles de mayor H, con valor promedio de 19,33 m, mientras que, en la parcela 7 se verificaron los árboles más bajos en promedio (16,76 m).

Para el caso de gi, se constató un promedio general de 0,0302 m² árbol⁻¹ con un D. E. de 0,0039 y un C. V. de 12,97%. En lo que respecta a G, los datos verificados muestran un promedio general de 32,24 m² ha⁻¹, con un D.E. de 3,50 y un C. V. de 10,9%. El VTi promedio de los 332 árboles evaluados fue de 0,2155 m³ árbol⁻¹, donde el promedio mayor fue de 0,2661 m³ árbol⁻¹ y el promedio menor de 0,1507 m³ árbol⁻¹. Por último, podemos observar el promedio de V expresado en m³ ha⁻¹,

donde el valor que se registró fue de $230,30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, con un D. E. de 41,36 y un C. V. de 18,0%.

4.2. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA

En la Tabla No. 4 se muestra una descripción general de las características dendrométricas y de la biomasa en las fracciones evaluadas, respectivamente, para los 33 árboles considerados en las evaluaciones destructivas.

Tabla No. 4

Características dendrométricas de los individuos utilizados en el muestreo destructivo.

Clases de diámetro	Número de árboles evaluados	Promedio de DB (cm)	Promedio de DAP (cm)	Promedio de DC (m)	Promedio de HT (m)	Promedio de HC (m)	Promedio de Hc (m)	Promedio de g_i ($\text{m}^2 \text{ árbol}^{-1}$)	Promedio de VTi ($\text{m}^3 \text{ árbol}^{-1}$)
1	3	35,70	27,54	5,90	20,43	17,58	9,67	0,0597	0,4407
2	5	29,28	23,24	5,18	20,60	18,13	9,22	0,0425	0,3457
3	13	21,66	18,80	4,33	20,26	17,17	9,23	0,0281	0,1984
4	8	17,29	14,12	3,60	17,01	13,74	6,94	0,0158	0,1017
5	4	13,15	10,03	2,84	14,65	10,05	6,08	0,0079	0,0420

Nota. DB = diámetro de la base, DAP = diámetro a la altura del pecho, DC = diámetro de copa, HT = altura total, HC = altura comercial, Hc = altura de copa, g_i = área basal individual y VTi = volumen total individual.

En la Tabla No. 4 se presentan los datos de la población evaluada, donde los árboles fueron seleccionados en base a la frecuencia de las clases de diámetro. Considerando a la clase 3 como la clase central, al compararla con la clase 1 dentro de la cual se encuentran los individuos más grandes, se constató un aumento de la variable DB del 64,8%. Si se toma el DAP como referencia, entre la clase de diámetro 3 y la clase 1 se observa una diferencia de 8,74 cm que representa un aumento del 46,4% de la clase de diámetro mayor, respecto a la clase central. Mientras que, si para esas mismas dos clases de diámetro se observa la altura total, prácticamente no hay diferencia entre ellas. Por otro lado, al realizar la comparación entre la clase 5, que contiene a los individuos más pequeños, con la clase central 3, se observó un incremento del 64,7% en la variable DB y una diferencia en DAP de 8,77 cm que representa un 87,4% de aumento. En cuanto a la altura total, se constató una diferencia importante, la cual es de 5,61 m entre las clases de diámetro 3 y 5.

Considerando las dimensiones de los individuos de las clases de diámetro, se verificó, conforme a lo esperado, una reducción de la BT con la reducción de las dimensiones de las clases (Tabla No. 5).

Tabla No. 5

Características de la biomasa en las fracciones evaluadas de los individuos utilizados en el muestreo destructivo.

Clases de diámetro	Número de árboles evaluados	Promedio de BT (kg árbol ⁻¹)	Promedio de BF (kg árbol ⁻¹)	Promedio de RG (kg árbol ⁻¹)	Promedio de RF (kg árbol ⁻¹)	Promedio de HJ (kg árbol ⁻¹)
1	3	568,97	498,00	42,12	8,28	20,57
2	5	460,22	406,40	29,83	5,62	18,37
3	13	261,79	232,83	13,29	4,57	11,00
4	8	132,50	118,21	6,44	2,42	5,52
5	4	60,66	50,74	5,29	1,47	3,16

Nota. BT = biomasa total, BF = biomasa fustal, RG = ramas gruesas, RF = ramas finas y HJ = hojas.

La BF representó entre un 80 y 90% de la BT, mientras que las RG entre un 4 y 9%, las HJ entre un 3 y un 6% y las RF entre 1 y 3%. A continuación, se presentan los rangos de las variables explicativas utilizadas para la modelación (Tabla No. 6).

Tabla No. 6

Límite inferior y límite superior para cada variable.

ID	Variable modelada (kg)	Límite inferior	Límite superior
1	Biomasa total	DAP (9.23) Hc (3.25) HT (13.90)	DAP (27.05) Hc (13.25) HT (23.10)
1.1	Biomasa total	DAP (9.55)	DAP (27.06)
2	Biomasa fustal	DAP (9.23) Hc (3.25) HT (13.90)	DAP (27.05) Hc (13.25) HT (23.10)
2.1	Biomasa fustal	DAP (9.55)	DAP (27.06)
3	Ramas gruesas	DAP (9.55) Hc (3.25) HT (14.80)	DAP (29.6) Hc (13.25) HT (22.10)
4	Ramas finas	Dc (2.30) Hc (4.50)	Dc (6.10) Hc (13.10)
4.1	Ramas finas	DAP (9.23)	DAP (29.6)
5	Hojas	DB (12.50) Dc (2.30) Hc (3.25)	DB (35.20) Dc (6.03) Hc (13.25)

Nota. DB = diámetro de la base, DAP = diámetro a la altura del pecho, Hc = altura de copa, HT = altura total y Dc = diámetro de copa.

En la tabla anterior (Tabla No. 6), se presenta la amplitud de los datos utilizados para la modelación. Por lo tanto, si se utilizan valores fuera de los límites

presentados para cada variable, la cinética que vinculan las variables independientes con las distintas fracciones de biomasa puede no corresponder.

Los MLG ajustados según las diferentes variables se presentan en la Tabla No. 7. Para la BT y BF resultaron significativas las variables DAP, Hc y HT, obteniendo un pseudo R^2 0,96, y considerando estos modelos solamente con el DAP, presentaron valor sensiblemente inferior (0,95 y 0,91 respectivamente).

Tabla No. 7

Tabla con los modelos ajustados.

ID	Variable modelada	Modelo	pseudo $-R^2$	AIC	N
1	BT	$BT = \exp (2,2719 + 0,1123 \times DAP + 0,0339 \times Hc + 0,0427 \times HT)$	0,96	282,37	30
1.1	BT	$BT = \exp (3,0686 + 0,1308 \times DAP)$	0,95	286,6	29
2	BF	$BF = \exp (2,0508 + 0,1151 \times DAP + 0,0281 \times Hc + 0,0481 \times HT)$	0,96	290,3	31
2.1	BF	$BF = \exp (2,9745 + 0,1284 \times DAP)$	0,91	300,32	30
3	RG	$RG = \exp (1,0724 + 0,1350 \times DAP + 0,1027 \times Hc - 0,0975 \times HT)$	0,88	147,43	27
4	RF	$RF = \exp (- 1,6484 + 0,4705 \times Dc + 0,1160 \times Hc)$	0,81	87,73	29
4.1	RF	$RF = \exp (- 0,4269 + 0,0934 \times DAP)$	0,66	101,22	31
5	HJ	$HJ = \exp (- 0,4557 + 0,0438 \times DB + 0,2656 \times Dc + 0,0672 \times Hc)$	0,80	141,95	31

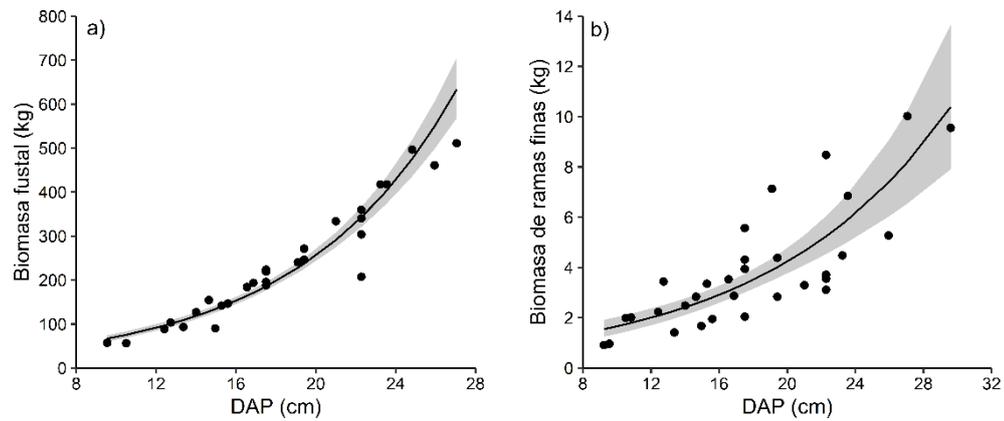
Nota. BT = biomasa total, BF = biomasa fustal, RG = ramas gruesas, RF = ramas finas, HJ = hojas, DAP = diámetro a la altura del pecho, Hc = altura de copa, Dc = diámetro de copa, DB = diámetro de la base y HT = altura total.

Para RG el pseudo R^2 fue de 0,88 considerando DAP, Hc y HT. En el caso del modelo incluyendo únicamente el DAP, resultó no significativo. En cuanto a las RF, el resultado de pseudo R^2 fue de 0,81 teniendo en cuenta DC y Hc como variables significativas, y de 0,66 considerando solamente el DAP. Por último, el ajuste de HJ verificó un R^2 de 0,80, con DB, Dc y Hc como significativas, no siendo significativo el modelo únicamente con el DAP.

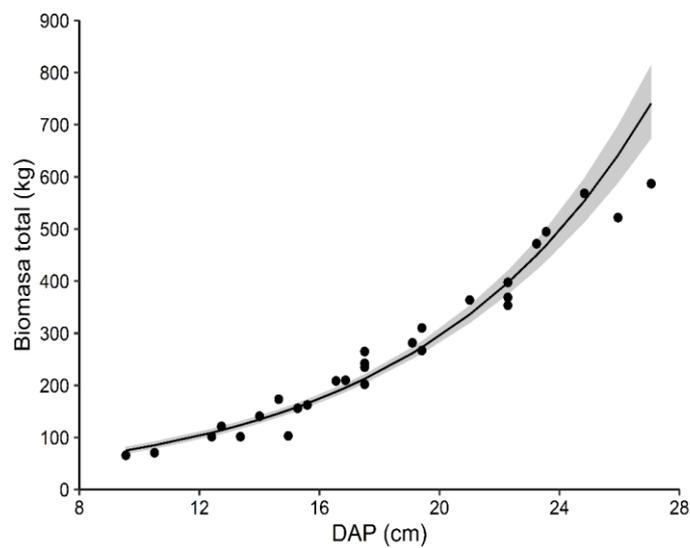
En la Figura No. 9 se puede observar la relación entre el DAP (cm) y la biomasa presente tanto en el fuste como en ramas finas. La dispersión entre los puntos del gráfico y la línea de regresión refleja los valores obtenidos de pseudo- R^2 , el cual fue superior para la fracción del fuste. La relación existente entre la biomasa total y el DAP se presenta a continuación en la Figura No. 10.

Figura No. 9

Relación entre el DAP y a) biomasa en el fustal, b) biomasa en ramas finas.

**Figura No. 10**

Relación entre biomasa total (kg) y DAP (cm).



4.3. ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO

A continuación, en la Tabla No. 8 se presenta las estimaciones de biomasa a nivel de hectárea, conteniendo las diferentes fracciones de biomasa y parcelas evaluadas.

Tabla No. 8

Estimación de biomasa a nivel de ha por parcela para las diferentes fracciones de biomasa.

Parcela	Fustal	Ramas gruesas	Ramas finas Mg ha⁻¹	Hojas	Total
1	276,09	17,98	4,73	16,41	318,53
2	231,05	17,36	2,82	10,65	266,51
3	202,22	12,41	2,63	9,03	232,18
4	338,94	20,42	4,00	14,13	391,81
5	276,95	18,25	3,28	13,18	320,09
6	228,41	16,97	2,74	11,28	263,72
7	227,29	13,73	2,73	11,67	262,49
8	319,62	22,28	3,54	13,67	370,94
9	275,65	16,59	3,23	11,69	318,78
10	234,44	14,27	2,92	10,21	270,00
Promedio	261,07	17,03	3,26	12,19	301,51
D.E	46,39	2,86	0,64	2,17	48,87
C.V.	17,77%	16,78%	19,63%	17,80%	16,21%

En la tabla anterior se pueden observar los valores promedio de biomasa producidos por cada fracción de los árboles, agrupados por parcela. Reúne, por lo tanto, la información correspondiente a los 332 árboles que forman parte del inventario realizado para el presente estudio. En cuanto a los resultados que se exponen en la tabla, se puede apreciar que, de todas las variables presentes, la biomasa en ramas gruesas fue la que tuvo una menor variación (16,78%) mientras que la biomasa presente en las ramas finas fue la que más varió (19,63%). Por otra parte, el porcentaje que cada variable representó del total de la biomasa, en todas las parcelas se comportó de la misma manera, siendo el fuste el responsable de la mayor proporción, seguido de las ramas gruesas, las hojas y por último las ramas finas.

En la Tabla No. 9 se ven reflejados los valores de C por ha en toneladas, que contiene cada fracción de las 10 parcelas de inventario forestal. La fracción ramas gruesas a nivel de parcelas fue la que presentó mayor variación (23,79%), seguido por la biomasa de ramas finas (20,58%), las hojas (17,80%) y en último lugar el fuste (16,87%).

Tabla No. 9

Presenta el contenido de carbono por hectárea en toneladas, que contiene cada fracción de las 10 parcelas bajo estudio.

Parcela	Fustal	Ramas gruesas	Ramas finas Mg ha ⁻¹	Hojas	Total
1	115,62	10,41	2,02	7,21	130,79
2	96,76	7,54	1,21	4,68	110,63
3	84,69	5,39	1,12	3,97	95,59
4	141,95	8,87	1,71	6,21	159,59
5	115,99	8,08	1,40	5,79	131,20
6	95,66	6,41	1,17	4,96	109,23
7	95,19	5,01	1,17	5,13	107,10
8	133,86	9,00	1,52	6,01	151,78
9	115,44	6,48	1,38	5,14	129,76
10	98,18	6,14	1,25	4,49	110,64
Promedio	109,33	7,33	1,39	5,36	123,63
D.E	18,45	1,74	0,29	0,95	20,65
CV	16,87%	23,79%	20,58%	17,80%	16,70%

Se destacan las parcelas 1, 4, 5, 8 y 9, las cuales obtuvieron un contenido total de C por hectárea en toneladas superior al promedio de todas las parcelas, y, por lo tanto, el contenido de C total acumulado de las parcelas 2, 3, 6, 7 y 10 fue menor al promedio.

Podemos inferir de la tabla que el C acumulado en el fuste representa el 88,43% del C total, por su parte las ramas gruesas almacenan en promedio 5,93%, las hojas un 4,34% y las ramas finas apenas el 1,12% del total acumulado. Al establecer una comparación entre el promedio total de C y el promedio total de biomasa para las 10 parcelas evaluadas, se verificó que el C representa un 41,8% en el fuste, 42,8% en ramas finas, 43,0% en ramas gruesas y 43,9% en hojas (Tabla No. 10).

Tabla No. 10*Porcentaje de cada fracción representada por Carbono.*

Fracción	% de Carbono
Hojas	43,9
Ramas gruesas	43,0
Ramas finas	42,8
Fuste	41,8

Finalmente, en la Tabla No. 11 se presentan las estimaciones de biomasa y C teniendo en cuenta la totalidad de la superficie que abarca el rodal. En ambos casos el fuste fue el compartimento de la masa arbórea que más representó del total, seguido de las ramas gruesas, hojas y por último las ramas finas. Se desprende de la tabla, que, si tomamos en cuenta la producción total de biomasa y la comparamos con la totalidad del C producido, se concluye que del 100% de la biomasa que contiene el rodal, un 41% está representado por el carbono.

Tabla No. 11*Estimación de biomasa y carbono en toneladas, contemplando toda la superficie del rodal (11,67 ha).*

Variable	Fustal	Ramas gruesas	Ramas finas Mg	Hojas	Total
Biomasa	3046,64	198,69	38,04	142,26	3518,57
Carbono	1275,93	85,58	16,22	62,55	1442,78

5. DISCUSIÓN

El análisis de los factores de forma (FF) de las distintas clases de diámetro arrojó un promedio de 0,3703 (Tabla No. 2) siendo este un valor esperable debido a las características limitantes que presenta el sitio bajo estudio. La calidad del sitio influye en el crecimiento y forma de los individuos, por lo tanto, aquellos sitios de menor calidad, como pueden ser los suelos superficiales sobre los que se realizó este trabajo, van a llevar a que los árboles tengan limitaciones para el crecimiento en altura presionándolos a ser más cónicos y como resultado su factor de forma va a tender a ser más bajo. Por otra parte, el rango obtenido de los FF para las distintas clases osciló entre 0,3560 y 0,3934 presentando un desvío estándar (D.E) de 0,0147 y un coeficiente de variación (C.V) de 3,97%, por lo que no presentó gran variación entre las mismas, atribuible a la homogeneidad del sitio.

Según datos presentados por González y Lago (2006), el FF para *E. dunnii* en plantaciones de 10 años de edad corresponde a 0,406 para árboles de 26,82 m de altura y 22,3 cm de DAP, con un D. E. de 0,03 y un C. V. de 6,96%. Este estudio fue realizado en el departamento de Rio Negro sobre los grupos CONEAT 9.1 y 9.3, los cuales reúnen condiciones más adecuadas para el crecimiento de la especie bajo estudio. Por lo tanto, se podría concluir que ambos valores no se asemejan, lo que es esperable debido a las diferentes características que presentan los sitios sobre los que se realizaron los distintos estudios. También es coherente que sea mayor el D. E. y C. V. debido a que en el estudio citado se consideraron dos grupos CONEAT (9.1 y 9.3), o sea, en un sitio menos homogéneo al de este trabajo.

En la Tabla No. 3 se presentan las variables dasométricas del inventario forestal para los 332 árboles evaluados. Para el caso del DAP, se verificó un valor máximo de 21,18 cm en la parcela 8, mientras que el valor mínimo fue de 17,19 cm para la parcela 3. El DAP promedio para todas las parcelas evaluadas fue de 18,88 cm con un D. E. de 1,21 y un C. V. de 6,43%. Con lo que respecta a H, el promedio general fue de 18,16 m, con una dispersión baja, ya que se verificó un D. E. de 1,00 y un C. V. de 5,51%. Fue en la parcela 4 donde se registraron en promedio los individuos más altos, con una H de 19,33 m, mientras que en la parcela 3 se verificó el valor promedio de H más bajo (16,77 m). El promedio de G fue de 32,24 m² ha⁻¹ con un D. E. 3,50 y C.V 10,90%. En cuanto al promedio de V (m³ ha⁻¹) el promedio general fue de 230,29 m³ ha⁻¹ con un D. E. de 41,36 y un C. V. de 18,0%. La dispersión de los datos fue la más alta para esta variable, encontrando el valor máximo en la parcela 4 con un V promedio de 286,90 m³ ha⁻¹, y un valor mínimo en la parcela 3 de 155,80 m³ ha⁻¹.

Según datos presentados por Balmelli y Resquin (2006) para plantaciones de *E. dunnii* de 9 años de edad en el departamento de Tacuarembó, instalados en Zona 7 (areniscas), se verificó un DAP promedio de 21,7 cm, una H de 20,4 m y un V de 337 m³ ha⁻¹ y, para plantaciones de 11 años de edad de la misma especie, se constató un DAP promedio de 20,6 cm, una H de 25,9 m y un V de 643 m³ ha⁻¹. Es decir, que tanto las plantaciones de 9 años como las de 11 años de edad, presentan un DAP, H y V mayor a los verificados en este trabajo. Podría concluirse que esta diferencia se debe al sitio donde fueron instaladas dichas plantaciones, donde los rendimientos están menos limitados. Sin embargo, hay que considerar la diferencia de edades a las que fueron relevados dichos datos, 10 vs 9 / 11 años.

Según Viera et al. (2013), para un rodal de *Eucalyptus urophylla* x *E. globulus* de 10 años de edad en El Dorado do, Rio Grande do Sul, Brasil, se verificó el promedio de las siguientes variables: DAP 20,16 cm, HT 20,67 m y G de 34,6 m². Los valores superiores alcanzados en este trabajo con respecto a los verificados en el presente estudio podrían deberse a la calidad del sitio sumado al rendimiento diferencial de la especie utilizada con respecto al de *E. dunnii*.

En la Tabla No. 4 se presentan las características dendrométricas de los individuos por clase de diámetro, utilizados en el muestreo destructivo. En base a estos resultados, se puede afirmar que los individuos de la clase 3 llegaron a una estabilidad del valor de la altura total de la población debido a que no presentaron diferencias con la clase superior en esta variable (20,26 m vs 20,43 m). Por otra parte, sí se observó una diferencia de aumento considerable entre la clase 1 y 3 y la 3 y la 5 en el DAP, el cual varía de 27,54 cm en la clase 1 a 10,03 cm en la clase 5, siendo el DAP de la clase central 18,80 cm. Por lo tanto, se puede concluir que hay un comportamiento diferencial mostrado por las variables entre las clases.

En este sentido, González y Lago (2006) registraron una HT promedio de 26,828 m, Hc promedio de 22,076 m, DAP promedio de 23,4 cm para *E. dunnii* de 10 años sobre grupos CONEAT 9.1 y 9.3, en un sitio ubicado a 15 km de Algorta, departamento de Río Negro. Cabe destacar que aparearon 25 árboles teniendo el mismo criterio de selección de los individuos al utilizado en el presente estudio. Al comparar dichas variables con las verificadas en este trabajo, tanto el DAP como HT y Hc son superiores, por lo que podemos concluir que la diferencia se debe a la calidad del sitio ya que se está comparando una misma especie con los mismos años de edad pero que están sobre grupos CONEAT diferentes: 9.1 y 9.3 vs. 2.12.

En la Tabla No. 5 se encuentran los registros de biomasa en las fracciones evaluadas de los individuos utilizados en el muestreo por clase de diámetro. Para el caso de la BT, se verificó un máximo de 568,97 kg árbol⁻¹ para la clase de diámetro 1 y 60,66 kg árbol⁻¹ para la clase de diámetro 5. De este mismo modo, el rango obtenido para BF es de 498 kg árbol⁻¹ a 50,74 kg árbol⁻¹, para RG de 42,12 kg árbol⁻¹ a 5,29 kg árbol⁻¹, RF de 8,28 kg árbol⁻¹ a 1,47 kg árbol⁻¹ y HJ de 20,57 kg árbol⁻¹ a 3,16 kg árbol⁻¹. Según las estimaciones realizadas por Hirigoyen et al. (2021) mediante el muestreo destructivo de 90 árboles de *E. dunnii* de 8,6 años de edad, con un DAP de 18,8 cm y una H de 23,9 m, se verificó una media para la biomasa aérea total de 389,1 kg, una biomasa de fuste de 344,6 kg, un follaje de 21,3 kg y 20,9 kg en las ramas. Por lo tanto, la biomasa del fuste representa aproximadamente el 88,56 % de la biomasa aérea total, el follaje un 5,47% y las ramas un 5,37%. La biomasa aérea total fue mayor a la verificada en el presente trabajo a pesar de la diferencia de edad, 8,6 vs 10 años. Más allá de que el DAP fue similar, la variación en altura (23,9 vs 18,16 m) podría explicar la mayor biomasa acumulada, sumado a la diferencia de calidad de sitio. Sin embargo, si comparamos lo que cada fracción representa de la biomasa total, se puede observar que los valores son semejantes. Winck et al. (2015), estimaron la biomasa de diferentes compartimentos aéreos de *Eucalyptus grandis* en la región noreste de Argentina, verificando a los 9 años de edad una BT de 599,8 kg árbol⁻¹, biomasa de fuste de 512,9 kg árbol⁻¹, biomasa total de ramas de 66,2 kg árbol⁻¹, y biomasa de hojas de 20,7 kg árbol⁻¹. Los registros de biomasa en dicho trabajo son superiores a los obtenidos en el presente estudio

para *E. dunnii*, a pesar de ser de menor edad (9 vs 10 años). Esto podría relacionarse no sólo a rendimientos diferenciales (mayor *E. grandis* respecto a *E. dunnii*), sino que también a la diferencia en la calidad del sitio.

En cuanto a los ajustes de los modelos de biomasa obtenidos, la comparación con los resultados de estudios similares de la literatura, pueden presentar variaciones debido al método de cálculo del coeficiente de determinación (R^2) y del pseudo coeficiente de determinación (pseudo R^2). Además, los modelos desarrollados son independientes entre sí y de esta manera la suma de la biomasa estimada para cada fracción puede presentar diferencias en cuanto al valor observado para la biomasa total de cada árbol. Entre los modelos de estimación de biomasa ajustados (Tabla No. 7) el mayor ajuste obtenido fue para BT y BF, mientras que el menor ajuste fue para RF y HJ. En este sentido, Hirigoyen et al. (2021) obtuvieron para las fracciones de biomasa en *E. dunnii* de 8,6 años distintos valores de R^2 , obteniendo el mejor ajuste para tallos y biomasa total sobre el suelo con un R^2 de 0,97 y un menor ajuste para el caso del follaje, con un R^2 de 0,90 y para ramas con un R^2 de 0,89. Por lo tanto, podemos concluir que los valores obtenidos para nuestro trabajo son compatibles con aquellos verificados en literatura y las posibles variaciones se explican debido a la inclusión de más variables a la hora de ajustar los modelos. Winck et al. (2015), ajustaron modelos lineales de estimación de biomasa para *E. grandis*, verificando un R^2 ajustado de 0,99 para BT y BF, RF 0,69, 0,65 para HJ y RG 0,53. Al igual que en dicha literatura, en nuestro estudio la mejor capacidad de predicción fue para BT y BF; sin embargo, el menor ajuste encontrado es para RF y HJ, y no para RG.

En la Tabla No. 8 se puede observar que, de las 10 parcelas evaluadas, fue en la parcela 4 donde se encontró la mayor cantidad de biomasa acumulada (391,81 Mg ha⁻¹) y en la parcela 3 donde se verificó la menor cantidad acumulada (232,18 Mg ha⁻¹). El promedio de todas las parcelas fue de 301,51 Mg ha⁻¹ por lo que en la parcela 4 se verificó un 29,7% más de biomasa, mientras que en la parcela 3 se constató un 23,0% menos. Si se toma en cuenta el promedio de todas las parcelas, el fuste representa aproximadamente el 88% de la biomasa total, ramas gruesas 6%, hojas 4% y ramas finas 2%.

Para la partición relativa de biomasa aérea, Poggiani et al. (1983) y Pereira et al. (1984) en *E. saligna* a los 8 y 9 años de edad, encontraron que un 85% de la biomasa aérea se presenta en los componentes tronco madera y tronco corteza, es decir, el fuste. Por lo tanto, la partición relativa de biomasa aérea se asemeja a la verificada en este trabajo, no obstante se debe considerar la diferencia de edad y de especies.

Viera (2012) en un rodal híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* en El Dorado, Rio Grande do Sul, Brasil, constató que la biomasa aérea total fue de 198,5 Mg ha⁻¹ a los 10 años de edad, donde el componente madera representó 84,2%, la corteza 9,5%, ramas 4,5% y hojas 3,6%. Por lo tanto, si bien se evidenciaron diferencias en la estimación de biomasa total, la partición relativa de las fracciones se asemeja a la verificada en este trabajo. Se debe tener en cuenta la diferencia en las especies bajo estudio en ambos casos, *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* vs *E. dunnii*. Ferrere et al. (2014) estimaron la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill localizados en el centro-oeste

de la provincia de Buenos Aires, y al igual que en el presente trabajo, encontraron que en el fuste es donde se acumula la mayor cantidad de biomasa aérea y siempre dicha fracción representó más del 50% del total de la biomasa aérea.

En la Tabla No. 9 se presenta el contenido de C por hectárea en toneladas que contiene cada fracción de las 10 parcelas bajo estudio. El promedio de todas las parcelas evaluadas fue de 123,63 Mg ha⁻¹, en la parcela 4 se registró el máximo contenido de C estimado por parcela, con un total de 159,59 Mg ha⁻¹ y en la parcela 3 el menor stock registrado, con un valor de 95,59 Mg ha⁻¹. Como se detalla en la tabla No. 10, la fracción de las ramas fue la que alojó un mayor stock de C, luego las ramas y por último las hojas.

Viera y Rodríguez (2019), quienes evaluaron las reservas de C en varias fracciones de árboles en una plantación de 10 años de *Eucalyptus urophylla* ST Blake x *Eucalyptus globulus* Lábil, en el sur de Brasil, determinaron que el contenido de C alcanzó un total de 118,45 Mg ha⁻¹, dividido en las diferentes fracciones de biomasa, siendo 55,7 % ($\pm 0,6$), 50,4 % ($\pm 0,4$), 49,5 % ($\pm 0,6$) y 45,4 % ($\pm 0,9$) para hojas, ramas, madera y corteza, respectivamente. Por lo tanto, el contenido de C determinado fue más alto en las hojas, seguida por las ramas, la madera y por último la corteza. Se podría concluir que, el stock total de C obtenido tanto para los clones híbridos y para *E. dunnii*, ambos de 10 años de edad, fue similar (118,45 vs 123,63 Mg ha⁻¹) y en ambos casos, en relación a la BT de cada fracción, el mayor stock de C se alojó en las hojas, luego en ramas y por último en el fuste.

Según Olmedo et al. (2020), quienes calcularon la cantidad de existencias de C en especies forestales ubicadas en Chile, verificaron que el carbono acumulado en la biomasa aérea fue en promedio para *Eucalyptus globulus* de 105,9 Mg ha⁻¹ y en *Eucalyptus nitens* de 164,7 Mg ha⁻¹, a la edad de rotación de 10-14 años. Además, concluyeron que tanto la calidad del sitio como las especies utilizadas influyen en el contenido total de C presente en la biomasa aérea. Conforme a lo esperado, nuestro estudio arrojó un valor similar de C alojado en la biomasa aérea (123,63 Mg ha⁻¹), no obstante, se deben de considerar las diferencias en cuanto a las especies y el sitio bajo estudio.

6. CONCLUSIONES

Los modelos ajustados son herramientas de aplicación directa para la estimación tanto de biomasa aérea total como de carbono en las diferentes fracciones de *Eucalyptus dunnii* en la región sureste del Uruguay.

De todas las variables modeladas, las que presentaron un mayor ajuste (pseudó $R^2 = 0,96$) fueron BT y BF con más de una variable explicativa utilizada. En la modelación de las demás fracciones (RG, RF y HJ) fueron obtenidos modelos con elevada capacidad predictiva (pseudó $R^2 > 0,65$) considerando más de una variable dendrométrica explicativa.

La cantidad de biomasa aérea total de *E. dunnii* a los 10 años de edad es en promedio $301,51 \text{ Mg ha}^{-1}$ y en toda la superficie del rodal $3.518,57 \text{ Mg}$. Mientras que la cantidad de C secuestrado en promedio fue de $123,63 \text{ Mg ha}^{-1}$ y de $1.442,78 \text{ Mg}$ para todo el rodal. La mayor cantidad de biomasa aérea y C se encontró en la fracción del fuste, luego en las ramas gruesas, hojas y por último en las ramas finas.

Para cuantificar biomasa y sus fracciones se recomienda utilizar el MLG con el DAP y H, aunque aquellas ecuaciones que contemplaron solamente el DAP tuvieron niveles aceptables, considerando además que la estimación de la altura conlleva un mayor esfuerzo de evaluación.

Se verifica que *E. dunnii* sobre grupo de suelos CONEAT 2.12 tiene un gran potencial tanto para la producción de biomasa aérea como para el secuestro de carbono.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Antepara-Basurto, J. A. (2019). *Modelo alométrico mediante técnicas de simulación para estimar biomasa aérea vegetal* [Tesis de maestría]. Universidad Internacional de la Rioja.
<https://reunir.unir.net/handle/123456789/8248>
- Balmelli, G., & Resquin, F. (2006). Productividad de diferentes especies de Eucalyptus sobre areniscas de Tacuarembó-Rivera. En M. Bemhaja & O. Pittaluga (Eds.), *30 años de investigación en suelos de areniscas INIA Tacuarembó* (pp. 305-312). INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7774/1/ST-159-305-312.pdf>
- Beets, P. N., Kimberley, M. O., Oliver, G. R., Pearce, S. H., Graham, J. D., & Brandon, A. (2012). Allometric equations for estimating carbon stocks in natural forest in New Zealand. *Forests*, 3(3), 818-839.
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., McDonald, M. W., & Turner, J. D. (Eds.). (2006). *Forest trees of Australia*. CSIRO.
- Broad, L. R. (1998). Allometry and growth. *Forest Science*, 44(3), 458-464.
<https://academic.oup.com/forestscience/article/44/3/458/4627512?login=false>
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Castañeda-Mendoza, A., Vargas-Hernández, J. J., & Gómez-Guerrero, A. (2012). Components of net aerial primary production in a *Bambusa oldhamii* plantation. *Agrociencia*, 46(1), 63-74.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000100006&lng=es&tlng=en
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA.
<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429021211104157.pdf>
- Cayuela, L. (2009). *Modelos lineales generalizados (GLM)*. EcoLab.
https://www.academia.edu/6847226/Modelos_lineales_generalizados_GLM
- Chabi, A., Lautenbach, S., Orekan, V. O. A., & Kyei-Baffour, N. (2016). Modelos alométricos y existencias de biomasa aérea de una cuenca hidrográfica de sabana de África occidental en Sudán en Benin. *Gestión y Balance de Carbono*, 11(1), 1-18.
- Cunia, T. (1986a). Construction of tree biomass tables by linear regression technique. En E. H. Wharton & T. Cunia (Eds.), *Estimating tree biomass regressions and their error* (pp. 27-36). USDA.
- Cunia, T. (1986b). Error of forest inventory estimates: Its main components. En E. H. Wharton & T. Cunia (Eds.), *Estimating tree biomass regressions and*

their error (pp. 1-14). USDA.

- Dávila Lara, M. A. (2015). *Estimación de la productividad de pinus teocote schldl. & cham. en Sierra de Álvarez, San Luis Potosí* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital UANL. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/13919>
- Di Rienzo, J. A., Macchiavelli, E., & Casanoves, F. (2012). *Modelos lineales mixtos: Aplicaciones en InfoStat*. Grupo Infostat.
- Dirección General Forestal. (2021). *Resultados Cartografía Nacional Forestal 2021*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/dgf-publico-cartografia-nacional-forestal-2021>
- Durán, A., & García Prechac, F. (2007). *Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación* (Vol. 1). Hemisferio Sur.
- Ferrere, P., Lupi, A. M., & Boca, R. T. (2014). Estimation of aerial biomass in Eucalyptus viminalis Labill trees and stands. *Quebracho*, 22(1-2), 100-113.
- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91-109. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6055225>
- González, A., & Lago, A. (2006). Estudio de la variación axial de la densidad de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill (*ex Maiden*) y *Eucalyptus dunnii* Maiden (Trabajo final de grado, Universidad de la República). Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/32991/1/GonzalezAlejandro.pdf>
- Google Earth. (s.f.). [Mapa satelital]. Google. Recuperado el 23 de junio de 2022, de <https://earth.google.com/>
- He, L., Chen, J. M., Pan, Y., Birdsey, R., & Kattge, J. (2012). Relationships between net primary productivity and forest stand age in US forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(3), Artículo GB3009. <https://doi.org/10.1029/2010GB003942>
- Hirigoyen, A., Resquin, F., Navarro Cerrillo, R., Franco, J., & Rachid Casnati, C. (2021). Métodos de estimación de biomasa en rodales para Eucalyptus grandis y Eucalyptus dunnii en Uruguay. *Bosque (Valdivia)*, 42(1), 53-66. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002021000100053&script=sci_arttext
- Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Birdsey, R. A. (2003). National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, 49(1), 12-35.
- Juárez, Y. (2014). *Dasometría apuntes de clase y guía de actividades prácticas*. https://www.academia.edu/35493332/DASOMETR%C3%8DA_Apuntes_de_Clase_y_Gu%C3%ADa_de_Actividades_Pr%C3%A1cticas
- Koppen, W. (1936). *Das geographische system der klimat*. Verlag von Gebrüger

Borntaeger.

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Das_geographische_System_der_Klimate_\(1936\).pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Das_geographische_System_der_Klimate_(1936).pdf)

- Kuyah, S., Dietz, J., Muthuri, C., Jamnadass, R., Mwangi, P., Coe, R., & Neufeldt, H. (2012). Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: II. Belowground biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 225-234.
- Losi, C. J., Siccama, T. G., Condit, R., & Morales, J. E. (2003). Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *Forest Ecology and Management*, 184(1-3), 355-368. https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/2225/Losi_Siccama_Condit_and_Morales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marco, M. A., & López, J. A. (1995). Performance of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in the Mesopotamia region, Argentina. En N. M. G. Borralho, R. N. Cromer, B. M. Potts, C. A. Raymond, J. B. Reid & W. N. Tibbits (Eds.), *Eucalypt plantations: Improving fibre yield and quality* (pp. 40-45). CRCTHF; IUFRO.
- Ministerio de Ambiente. (2020). *Uruguay en las negociaciones internacionales de cambio climático*. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/institucional/informacion-gestion/memorias-anuales/uruguay-negociaciones-internacionales-cambio-climatico#:~:text=El%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs%20exige,con%20la%20mayor%20ambici%C3%B3n%20posible>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2020). *CONEAT*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat>
- Montero, M., & Montagnini, F. (2005). Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, 45, 112-119.
- Nakagawa, S., Johnson, P. C., & Schielzeth, H. (2017). The coefficient of determination R^2 and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed-effects models revisited and expanded. *Journal of the Royal Society Interface*, 14(134), Artículo 20170213.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods* (pp. 961-1010). Soil Science Society of America.
- Olmedo, G. F., Guevara, M., Gilabert, H., Montes, C. R., Arellano, E. C., Barría-Knopf, B., Gárate, F., Quijana, P. M., Acuña, E., Brown H., & Ryan, M. G. (2020). Baseline of carbon stocks in *Pinus radiata* and *Eucalyptus* spp. plantations of Chile. *Forests*, 11(10), Artículo 1063. <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/10/1063>
- Ordoñez, Y., Andrade, H., Quirós, D., & Venegas, G. (2012). Dasometría y

cubicación de la madera. En G. Detlefsen & E. Somarriba (Eds.), *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica* (pp. 27-67). CATIE.

- Origgi, L. F. (1993). *Recursos naturales*. EUNED.
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4), 573-593.
<https://academic.oup.com/forestscience/article/45/4/573/4627607?login=false>
- Pereira, A. R., de Andrade, D. C., Leal, P. G. L., & dos Santos Teixeira, N. C. (1984). Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus citriodora* e *E. saligna* cultivados na região de cerrado de Minas Gerais. *Floresta*, 15(1-2), 8-16.
<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/viewFile/6346/4546>
- Petraglia, C., & Dell'Acqua, M. (2010). *Actualización de la Carta Forestal del Uruguay*. MGAP.
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: Del trabajo de campo a la predicción*. FAO.
- Poggiani, F., Couto, H. D., Corradini, L., & Fazzio, E. C. M. (1983). Exportação de biomassa e nutrientes através da exploração dos troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. *IPEF*, 25, 37-39.
<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr25/cap06.pdf>
- Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield*. Springer.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura forestal*. IICA.
<http://repiica.iica.int/docs/B4179e/B4179e.pdf>
- Salas, J., & Infante, A. (2006). Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 40, 47-70.
https://www.researchgate.net/profile/Angel-Infante-Cruz/publication/335610909_Produccion_Primaria_Neta_Aerea_en_Algunos_Ecosistemas_y_Estimaciones_de_Biomasa_en_Plantaciones_Forestales/links/5d6ff5f4a6fdcc9961af8507/Produccion-Primaria-Neta-Aerea-en-Algunos-Ecosistemas-y-Estimaciones-de-Biomasa-en-Plantaciones-Forestales.pdf
- Sanquetta, C. R., Corte, A. P., & da Silva, F. (2011). Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. *Carbon Balance and Management*, 6(1), 1-8. <https://link.springer.com/article/10.1186/1750-0680-6-6>
- Schlatter, J. E., & Gerding, V. (2014). Sitio forestal. En C. Donoso, M. E. González & A. Lara (Eds.), *Ecología forestal: Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*. UACH.
- Simangunsong, B. C. H., Sitanggang, V. J., Manurung, E. G. T., Rahmadi, A., Moore, G. A., Aye, L., & Tambunan, A. H. (2017). Potential forest

biomass resource as feedstock for bioenergy and its economic value in Indonesia. *Forest Policy and Economics*, 81, 10-17.
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.03.022>

Sociedad de Productores Forestales. (2022a). *Forestación y zonas forestadas*.
<https://www.spf.com.uy/forestacion-zonas-forestadas/#>

Sociedad de Productores Forestales. (2022b). *Preguntas frecuentes*.
<https://www.spf.com.uy/preguntas-frecuentes/>

Viera, M. (2012). *Dinâmica nutricional em um povoamento híbrido de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus em Eldorado do Sul-RS, Brasil* (Tesis de doctorado, Universidade Federal de Santa Maria). Manancial.
<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3743/VIERA,%20MARCIO.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Viera, M., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2019). A complete assessment of carbon stocks in above and belowground biomass components of a hybrid eucalyptus plantation in Southern Brazil. *Forests*, 10(7), 536.
<https://www.mdpi.com/1999-4907/10/7/536>

Viera, M., Schumacher, M. V., Trüby, P., & Araújo, E. F. (2013). Biomassa e nutrientes em um povoamento de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus, em Eldorado do Sul-RS. *Ecologia e Nutrição Florestal*, 1(1), 1-13.

Winck, R. A., Fassola, H. E., Barth, S. R., Crechi, E. H., Keller, A. E., Videla, D., & Zaderenko, C. (2015). Modelos predictivos de biomasa aérea de Eucalyptus grandis para el noreste de Argentina. *Ciência Florestal*, 25, 595-606.

Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>

8. ANEXO

Figura A1.

Biomasa total (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 1. Tabla No. 7

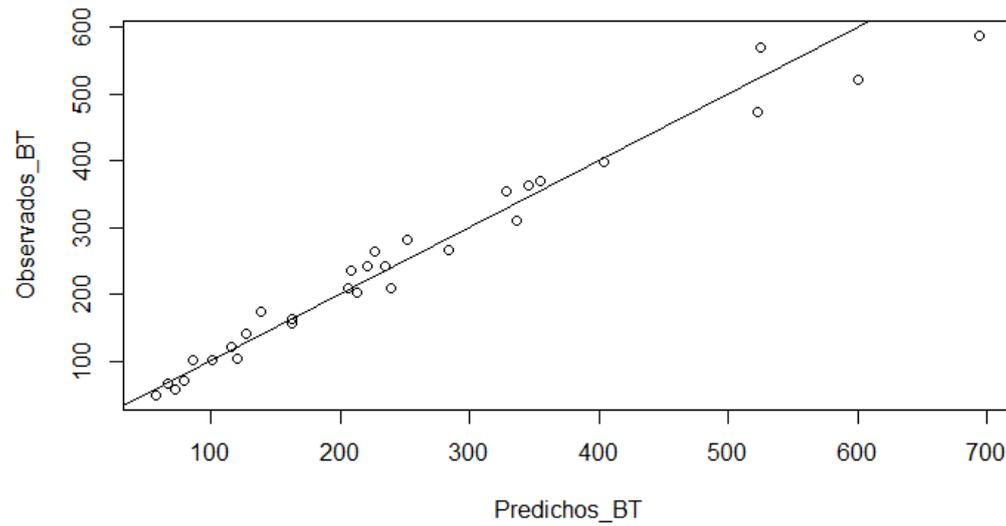


Figura A2.

Biomasa total (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 1.1 Tabla No. 7

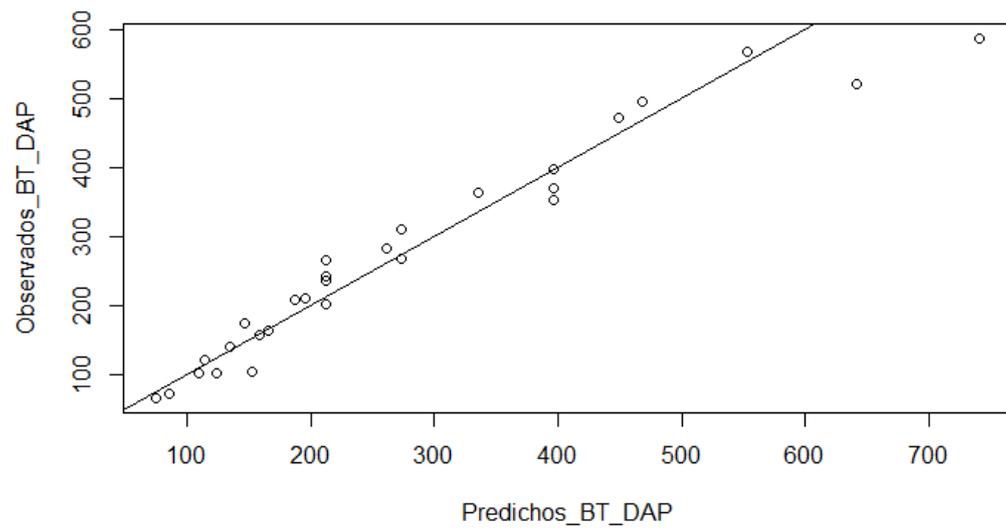
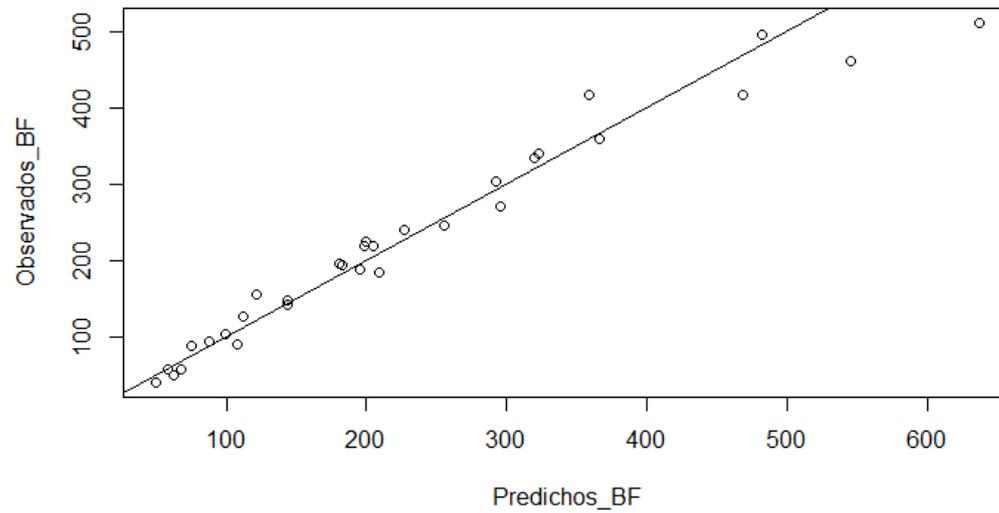


Figura A3.

Biomasa fustal (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 2. Tabla No. 7

**Figura A4.**

Biomasa fustal (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 2.1 Tabla No. 7

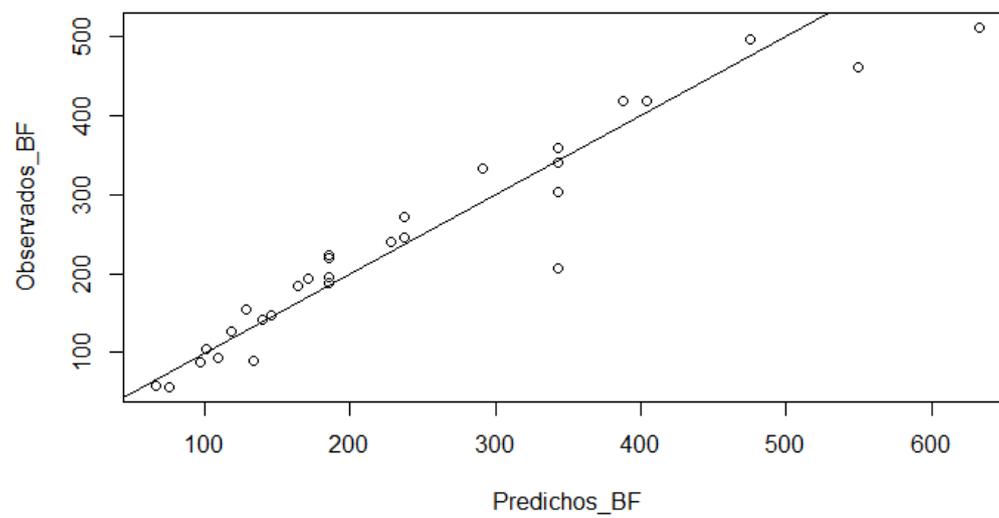
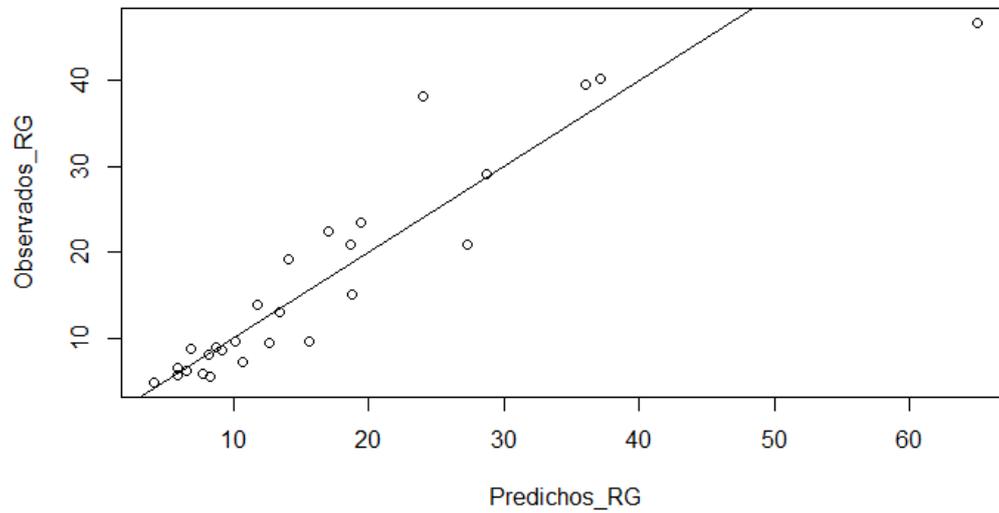


Figura A5.

Ramas gruesas (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 3. Tabla No. 7

**Figura A6.**

Ramas finas (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 4. Tabla No. 7

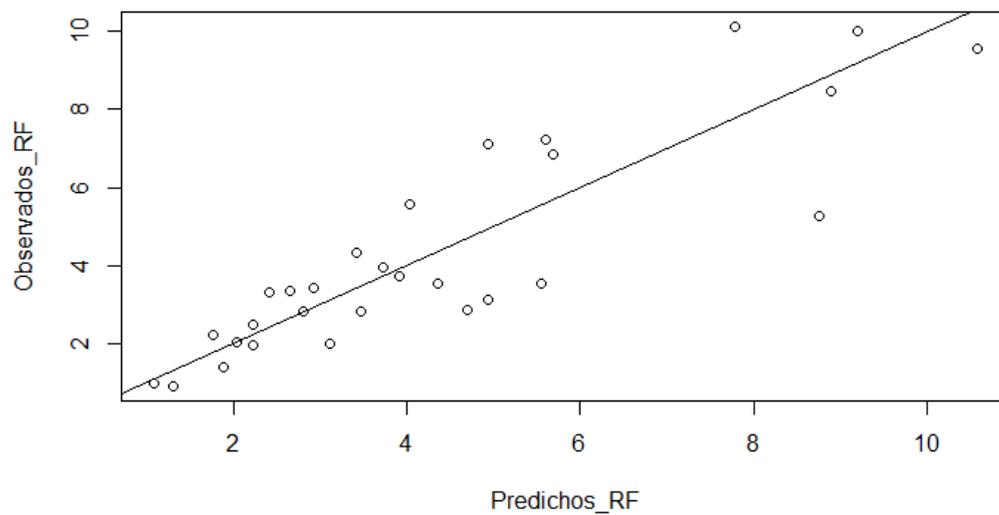
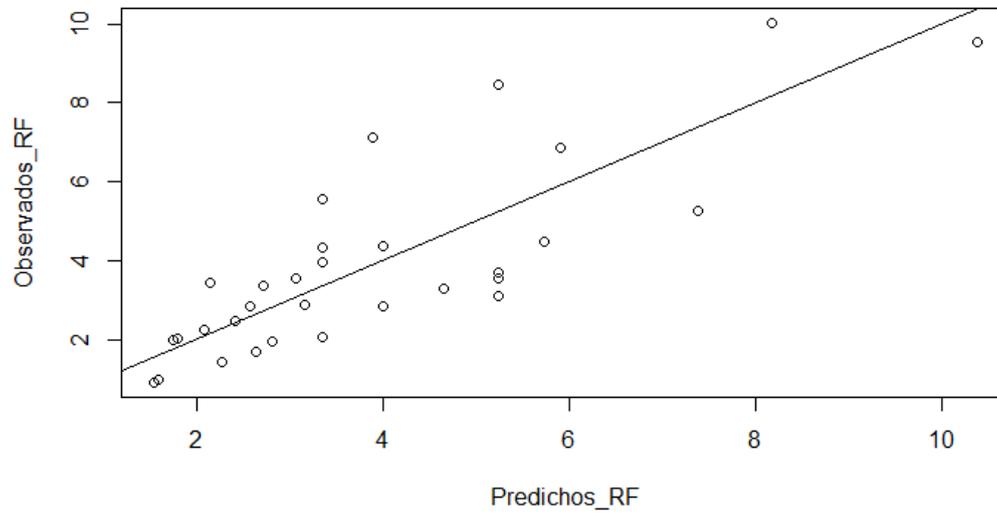


Figura A7.

Ramas finas (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 4.1 Tabla No. 7

**Figura A8.**

Hojas (predichos vs observados). Modelo de la ecuación 5. Tabla No. 7

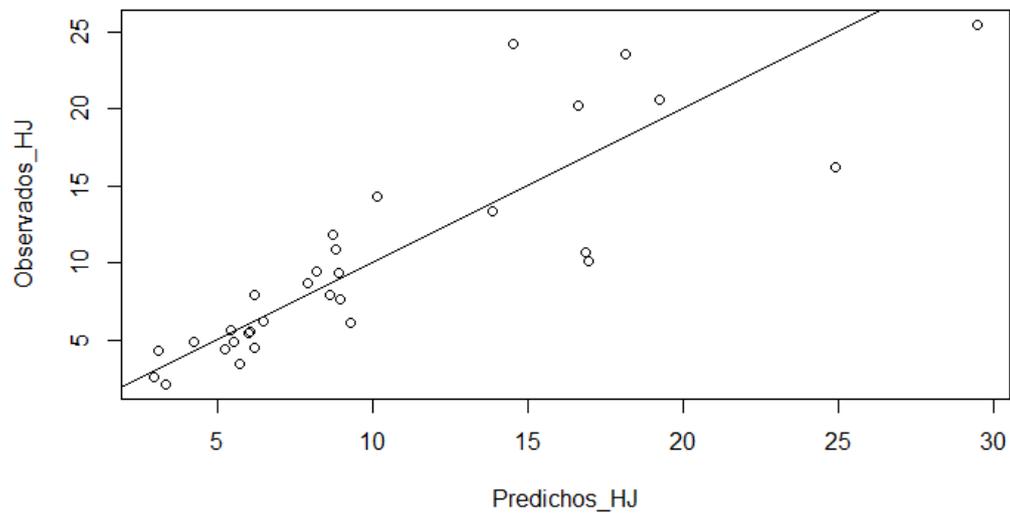
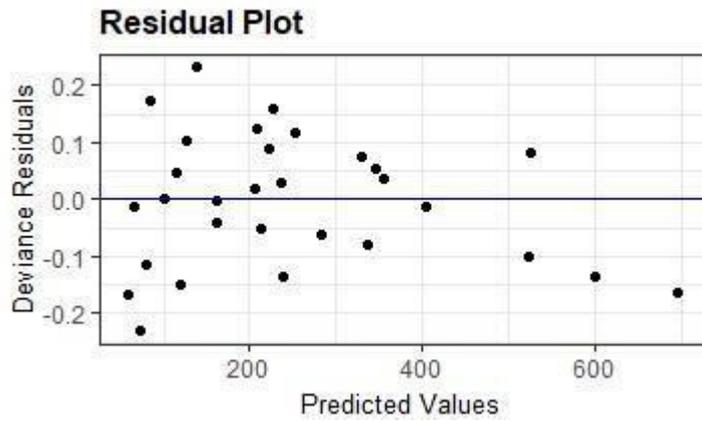


Figura A9.

Biomasa total (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 1. Tabla No. 7

**Figura A10.**

Biomasa total (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 1.1 Tabla No. 7

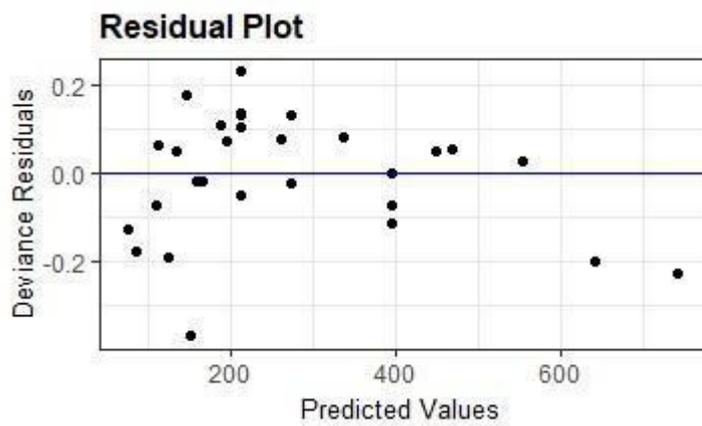
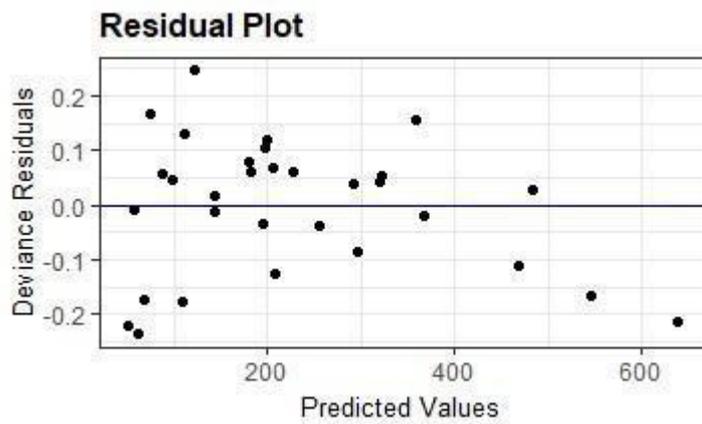


Figura A11.

Biomasa fustal (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 2. Tabla No. 7

**Figura A12.**

Biomasa fustal (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 2.1 Tabla No. 7

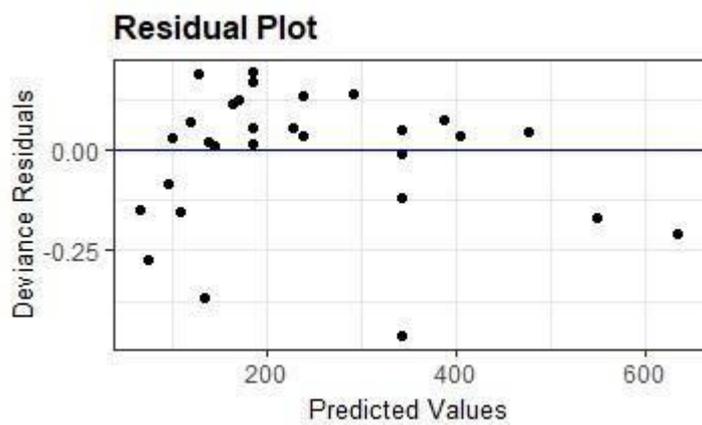
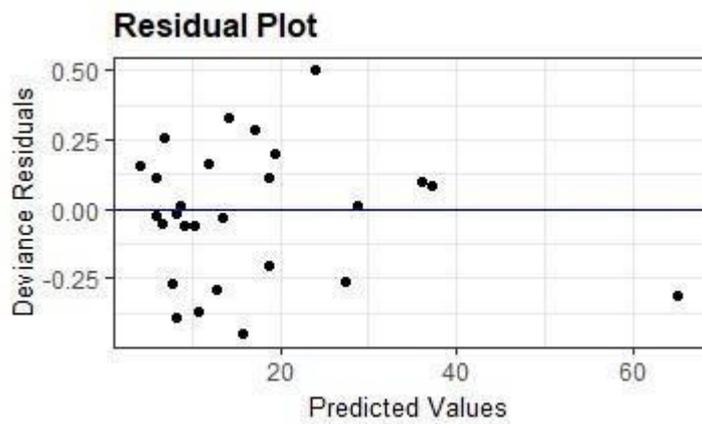


Figura A13.

Ramas gruesas (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 3. Tabla No. 7

**Figura A14.**

Ramas finas (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 4. Tabla No. 7

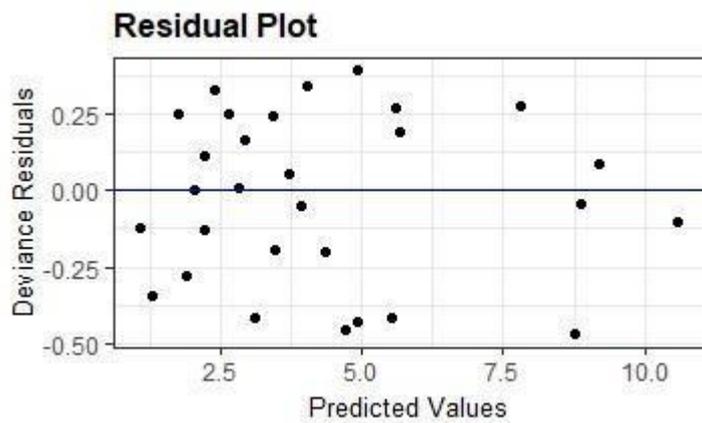
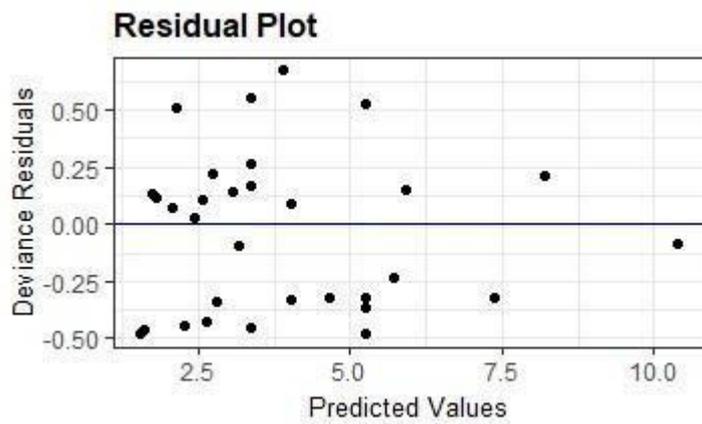


Figura A15.

Ramas finas (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 4.1 Tabla No. 7

**Figura A16.**

Hojas (predichos y desviación de residuos). Modelo de la ecuación 5. Tabla No. 7

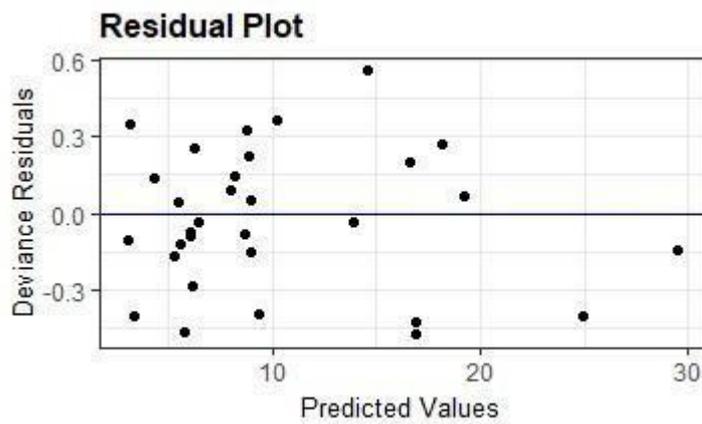


Figura A17.*Modelos y su significancia.*

ID	Variable modelada	Parámetros	p-valor
1	BT	Intercept	$\leq 0,0001$ ***
		DAP	$\leq 0,0001$ ***
		Hcopa	0,00308 **
		HT	0,00650 *
1.1	BT	Intercept	$\leq 0,0001$ ***
		DAP	$\leq 0,0001$ ***
2	BF	Intercept	$\leq 0,0001$ ***
		DAP	$\leq 0,0001$ ***
		Hcopa	0,0172 *
		HT	0,0028 **
2.1	BF	Intercept	$\leq 0,0001$ ***
		DAP	$\leq 0,0001$ ***
3	RG	Intercept	0,029836 *
		DAP	$\leq 0,0001$ ***
		Hcopa	0,000217**
		HT	0,006633*
4	RF	Intercept	$\leq 0,0001$ ***
		DC	$\leq 0,0001$ ***
		Hcopa	0,000191**
4.1	RF	Intercept	0,0771*
		DAP	$\leq 0,0001$ ***
5	HJ	Intercept	0,0865*
		DB	0,0061*
		DC	0,0064*
		Hcopa	0,0057*

Nota. $\leq 0,1$ '*'; $\leq 0,005$ '**' y $\leq 0,0001$ '***'